

İnşaat Mühendisliği Alanında Akademik Araştırmalar

Editör
Doç. Dr. Alper Bideci

İnşaat Mühendisliği Alanında Akademik Araştırmalar

Doç. Dr. Alper Bideci

İmtiyaz Sahibi
Platanus Publishing®

Editör
Doç. Dr. Alper Bideci

Kapak & Mizanpaj & Sosyal Medya
Platanus Yayın Grubu

Birinci Basım
Haziran, 2025

Yayımcı Sertifika No
45813

ISBN
978-625-8464-23-8

©copyright
Bu kitabın yayım hakkı Platanus Publishing'e aittir. Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin alınmadan hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Adres: Natoyolu Cad. Fahri Korutürk Mah. 157/B, 06480, Mamak,
Ankara, Türkiye.

Telefon: +90 312 390 1 118
web: www.platanuspublishing.com
e-mail: platanuskita@gmail.com



Platanus Publishing®

İÇİNDEKİLER

BÖLÜM 1	5
Doygun Kum Zeminlerde Sıvılaşma Kaynaklı Meydana Gelen Oturmalar Üzerine Bir Değerlendirme	
Evin Alpaslan & Mazlum Alpaslan & Barış Çetinkaya	
BÖLÜM 2	21
Modern Seraların İnşaatının Proje Yönetim Yazılımları ile Planlanması	
Hüseyin Yıldırım Dalkılıç & Semiha Şeyma Bozbek	
BÖLÜM 3	33
Geleneksel Sismik İzolatörlerin İncelenmesi ve Maliyet Analizi	
Bayram Ateş	
BÖLÜM 4	53
Trafik ve Kazalar	
Adem Ahıskalı (Adem Aliyev)	
BÖLÜM 5	65
Zemin Stabilizasyon Teknikleri ve Güncel Yaklaşımlar	
Bayram Ateş & Mehmet Ali Kalaylı	



Doygun Kum Zeminlerde Sıvılaşma Kaynaklı Meydana Gelen Oturmalar Üzerine Bir Değerlendirme

***Evin Alpaslan¹ & Mazlum Alpaslan² &
Barış Çetinkaya³***

¹ İnşaat Mühendisi, Batman Üniversitesi İnşaat Mühendisliği, ABD, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, ORCID: 0009-0007-9979-5139

² İnşaat Mühendisi, Batman Üniversitesi İnşaat Mühendisliği, ABD, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, ORCID: 0009-0004-2220-0393

³ İnşaat Mühendisi, Munzur Üniversitesi İnşaat Mühendisliği, ABD, Fen Bilimleri Enstitüsü, ORCID:0009-0008-2436-4868

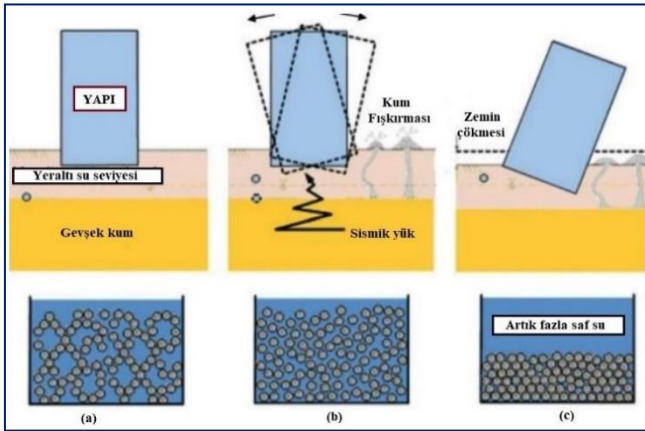
1.GİRİŞ

Depremler, bulundukları alanlardaki binaları çabuk ve çoğu zaman tamamen yıkılacak şekilde zarar vererek, insan yaşamını ciddi bir tehlikeye sokan sismik olaylardır.Geoteknik mühendisliğinde zeminlerin dinamik etkilerde, özellikle depremlerle ilişkili olarak önemli olgularından biri, suya doygun kumlu zeminlerin sıvılaşmasıdır. 1964 yılında meydana gelen Alaska ($M_w=9.2$) ve Niigata ($M_s=7.5$) gibi iki büyük deprem, sıvılaşma etkilerinin yeryüzünde ve yapıların üzerinde bıraktığı derin izlerle tarihe geçmiştir. Bu olayların ardından, sıvılaşmanın fiziksel mekanizmalarının anlaşılması ve analizi için saha ile laboratuvar deneylerine büyükbir ilgi gösterilmiştir. Doygun kumların sürekli olarak yüklendiğinde sıvılaşması (Seed ve Lee, 1966); doygun kumlarda sıvılaşma ile ilgili yapılan bir deneysel araştırma (Yoshimi, 1967); MinoOwari, Tohnankai ve Fukui depremleri sırasında sıvılaşmış kumların belirgin özellikleri (Kishida, 1969), bu alanda gerçekleştirilen ilk araştırmalardır.Seed (1976), Seed ve Idriss (1971) ile Stokoe ve ark. (1988) gibi birçok araştırmacı, hem laboratuvar çalışmaları yapmış hem de sıvılaşma analizi için saha ölçüm verileri (SPT, CTP ve kayma dalgası hızı) üzerinde yoğunlaşmışlardır.Castro (1975), sıvılaşmayı iki ayrı kategoriye ayırmıştır: Önceden belirlenmiş doygun kumlarda klasik sıvılaşma ve dinamik testler sırasında meydana gelen çevrimsel hareketlilik. Dinamik yükleme sırasında, hacim azalması sebebiyle doygun gevşek kumlardaki boşluk suyu basıncının ani bir yükseliş gösterdiği belirtilmiştir. Ayrıca, çevrimsel hareketlilik, dinamik yükleme altındaki sıkı kumlarda pozitif boşluk suyu basıncının ortaya çıkmasına neden olmakta ve bu da taneciklerin yer değiştirmesi ile hacim kaybına yol açmaktadır. Seed ve Idriss (1971), depreme maruz kalan kumların sıvılaşma olasılığını etkileyen temel etkenleri belirlemiş ve sıvılaşma potansiyelini tespit etmek için kolaylaştırılmış bir yöntem önermişlerdir. Andrus ve ark. (2004), sıvılaşma direncinin belirlenmesinde Seed ve Idriss (1971) tarafından önerilen basitleştirilmiş yöntemin genel formatını inceleyerek, standart penetrasyon darbe sayısı, koni penetrasyon direnci ve kayma dalgası hızına dayanarak üç farklı yöntemi karşılaştırmışlardır.

Bu çalışmada tasarlanan bir saha modeli için sıvılaşma ve sıvılaşma sonrası meydana gelebilecek oturmalar (TBDY,2018)'e göre Özçep (2010) tarafından geliştirilen A Microsoft Excel® spreadsheet© programı kullanılarak incelenmiştir. İlk aşamada, öncelikle suya doygun siltli kum zeminlerde sıvılaşma analizi yapılmış ve sıvılaşmaya bağlı olarak tekrarlı yüklerin etkisi ile kayma mukavemetinde oluşan azalmanın sonucu ortaya çıkan oturma Ishihara and Yoshimine (1992) yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Tasarlanan saha modelinde 7.2 ve 6.2 deprem büyüklüklerinde ve 0.34 g en büyük yatay yer ivme değeri için sıvılaşma potansiyelinin, sıvılaşmanın derinlikle değişiminin ve bu durumunda oluşacak oturmaların miktarının belirlenmesi amaçlanmaktadır.

2. MATERYAL VE METOT

Zemin sıvılaşması, yeraltındaki tabakaların geçici olarak dayanımını kaybedip, katı bir madde yerine viskoz bir sıvı gibi davranması durumudur. Özellikle, kil içermeyen kum, silt ve bazen çakıl gibi malzemeler sıvılaşma potansiyeli taşımaktadır. Deprem sırasında, dalgaların özellikle kayma dalgaları, suya doymuş daneli tabakaların içinden geçerken, tane yerleşim düzenini değiştirir. Bu durum, gevşek bir şekilde yer alan tanelerin hareket ederek yeniden yerleşmesine ve sıkışmasına yol açar. Eğer bu yerleşme sürecinde, daneler arasındaki su drene olmazsa, boşluk suyu basıncı yükselir. Bu basınç, üstteki tabakaların ağırlığına yakın bir seviyeye ulaştığında, daneli tabaka geçici olarak sıvı gibi davranarak sıvılaşma olayını tetikler. Boşluk suyu basıncındaki artışla birlikte topraktaki efektif gerilme azalır. Gözenek basıncı genel gerilmelerin değerine ulaştığında, rijitlik ve kayma zemin mukavemetinin kaybının yanı sıra potansiyel zemin oturmasına neden olur (Şekil 1). Zemin sıvılaştığında, yapılar ya zemine batma eğiliminde olur ya da hafif olan yapılar yukarı doğru hareket ederek yüzme davranışı sergileyebilir.



Şekil 1. Sıvılaşmaya neden olan sismik dalgaların (a) deprem öncesi, (b) deprem anı ve (c) deprem sonrası temel zemininde yapıda farklı oturma oluşturmalarının gösterimi (<https://www.geotech.hr/en/soil-liquefaction>)

Sıvılaşan zemindeki küçük kayma gerilmeleri, büyük şekil değiştirmelere neden olur ve bu durum, yapılarda zemin göçmesi gibi hasarlar ortaya çıkarır. Bir zeminin sıvılaşma eğilimi, esasen gevşek yerleşim yapısına, taneler arasındaki bağı ve kil miktarına, ayrıca boşluk suyunun drenajının engellenmesine bağlıdır (Celep ve Kumbasar, 2000; Uyanık, 2002). Sıvılaşma gerçekleştiğinde, zemin önemli hareketler ve deformasyonlar yaşayabilir. Büyük deprem yüklerinden etkilenen bir zeminde sıvılaşma sonrası oturma gibi deformasyonlar görülür. Suya doymuş gevşek kumlar tekrarlı gerilmeler altında mukavemetlerini hızla yitirirler. Bu durum, yerleşim değişikliklerini, yan tarafa yayılmayı içerebilir. Oturma ise, toprak dayanımının azalması sonucunda zemin çöktüğünde ortaya çıkar. Deprem dalgalarına maruz kalan

kumların sıkılaşma eğilimi gösterdiği kabul edilmektedir. Alt tabakalarda meydana gelen sıkılaşma, yüzeyde oturma olarak kendini gösterir. Depremden kaynaklanan oturmalar genellikle sığ temeller üzerine inşa edilmiş binalarda sıkıntılara yol açar ve sığ temellerle oluşturulmuş altyapı sistemlerinde hasar meydana getirir (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006).Şekil 2, Şekil 3 ve Şekil 4’de sıkılaşmaya bağılı oturma nedeniyle meydana gelmiş hasar örnekleri görölmektedir.



Şekil 2. Sıkılaşma dolayısıyla zeminde meydana gelen oturma sebebiyle 1971 San Fernando depreminin etkisiyle zarar gören San Fernando barajı



Şekil 3.Kobe Liman Adası'ndaki köprü ayaklarında oturma (1995 Hyogo-ken Nambu Depremi) (Tsukamoto ve Ishihara, 2010)



Şekil 4. Sıvılaşmaya bağlı olarak zeminde oturma nedeniyle 6 Şubat 2023 depreminde Adıyaman Gölbaşı'nda hasara uğrayan binalar

2.1. Basitleştirilmiş Sıvılaşma Analizi

Zeminlerin gerilme yönünden sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesinde, deprem esnasında zeminin sıvılaşmaya karşı güvenliği, zeminin çevrimsel direnç oranının (CRR), depremin etkisinin bir çevrimsel gerilme oranı (CSR) ile kıyaslanmaktadır. Deprem sırasında oluşan tekrarlı gerilme oranı, Seed ve Idriss (1971) tarafından Denklem (1)'deki gibi tanımlanmıştır.

$$CSR = 0.65 * \frac{\sigma_0}{\sigma'_0} * a_{max} * r_d \quad (1)$$

Denklem (1)'de, g , yer çekimi ivmesi; σ_0 ve σ'_0 sırasıyla, sıvılaşma değerlendirmesinin yapıldığı derinlikteki (z) toplam ve efektif gerilme; r_d ise gerilme azalım katsayısı olup Denklem (2a) ve (2b)'de verilen derinliğe bağlı ifadelerden belirlenmektedir (Liao ve Whitman 1986).

$$r_d = 1.0 - 0.00765 * z \quad z \leq 9.15 \text{ m} \quad (2a)$$

$$r_d = 1.174 - 0.0267 * z \quad 9.15 \text{ m} < z \leq 23 \text{ m} \quad (2b)$$

2.2. TBDY(2018)'e göre Standart Penetrasyon Testi (SPT) yöntemine bağlı Sıvılaşma Analizi

Özellikle iri daneli zeminlerin sıvılaşmaya karşı duyarlılığını belirlemede en sık başvurulan yöntem, Standart Penetrasyon Testi (SPT)dir. Standart penetrasyon deneyinde arazide ölçülen darbe sayısı (SPT-N); örtü basıncı, enerji oranı, sondaj kuyusu çapı, tij boyu ve numune alıcı türü gibi birçok faktöre bağlıdır. Bu nedenle, SPT'ye dayalı hesaplamalarda kullanılacak olan SPT-N değerlerinin öncelikle düzeltilmesi gerekmektedir (Tablo 1). 100 kPa'lık örtü basıncı ve % 60 enerji verimliliği için düzeltilmiş SPT-N değerleri, $(N_1)_{60}$, Denklem (3)'den elde edilir.

$$(N_1)_{60} = N * C_N * C_E * C_B * C_R * C_S \quad (3)$$

Denklem (3)'de; N : Araziden elde edilmiş ham SPT darbe sayısı, C_N : Kohezyonsuz zeminlerde uygulanan örtü yükü düzeltme katsayısı, C_R :Tij boyu düzeltme katsayısı, C_S : Numune alıcı tipi düzeltme katsayısı, C_B :Sondaj delgi çapı düzeltme katsayısı, C_E :Enerji verimliliği (oranı) düzeltme katsayısı ve $(N_1)_{60}$:Düzeltilmiş SPT darbe sayısıdır.

Tablo 1. SPT düzeltme faktörleri (TBDY, 2018)

Düzeltilme Faktörü	Ekipman Değişkeni	Düzeltilme Değeri
Örtü basıncı (C_N)	-	$(95.76/\sigma'_v) \ll 1.7$
Enerji oranı (C_E)	Halkalı tokmak Güvenli tokmak Otomatik darbeli tokmak	0.45 – 1.00 0.60 – 1.17 0.90 – 1.60
Sondaj delgi çapı (C_B)	65 – 115 mm 150 mm 200 mm	1.0 1.05 1.15
Tij boyu (C_R)	3 – 4 m 4 – 6 m 6 – 10 m 10 – 30 m	0.75 0.85 0.95 1.0
Numune alıcı tipi (C_S)	Standart numune alıcı İç tüpü olmayan numune alıcı	1.0 1.1 – 1.3

İnce dane oranı %5'den az olan temiz kumlar ($FC \leq \%5$) için $M_w = 7.5$ büyüklüğündeki depremler için sıvılaşmanın gerçekleştiği ve gözlenmediği bölgeleri ayıran eğri, Youd ve ark.(2001), tarafından temiz kum eğrisi (Şekil 5) olarak tanımlanmakta ve bu durum için tekrarlı direnç oranı ($CRR_{7.5}$) Denklem (4)'deki gibi formüle edilmektedir:

$$CRR_{7.5} = \frac{1}{34 - (N_1)_{60,cs}} + \frac{(N_1)_{60,cs}}{135} + \frac{50}{(10 * (N_1)_{60,cs} + 45)^2} - \frac{1}{200} \quad (4)$$

Kum içerisindeki ince dane miktarı artışı zeminin tekrarlı kayma direncini artırmaktadır. 100 kPa'lık örtü basıncı ve 7.5 büyüklüğündeki deprem için, ince dane oranının % 5'den fazla olması durumunda düzeltilmiş $(N_1)_{60}$ değerleri Denklem (5) kullanılarak eşdeğer temiz kum değerlerine $(N_1)_{60,cs}$ dönüştürülmektedir. Burada α ve β ifadeleri ince dane oranına bağlı olarak Denklem (6a), Denklem (6b) ve Denklem (6c)'de verilmiştir.

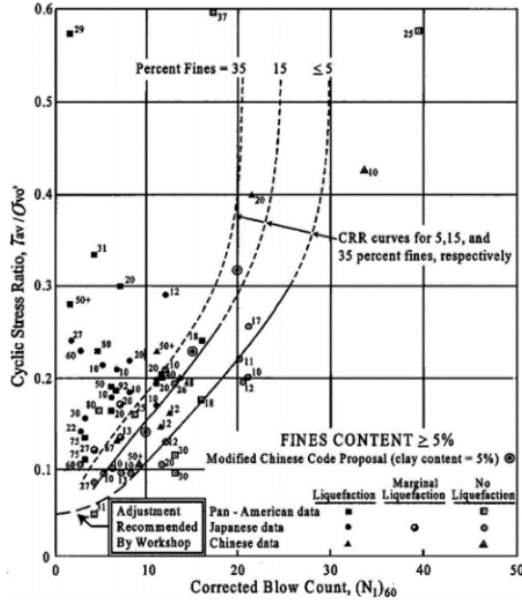
$$(N_1)_{60,cs} = \alpha + \beta * (N_1)_{60} \quad (5)$$

α ve β :

$$\alpha = 0, \beta = 1 \quad F.C. \leq \%5 \quad (6a)$$

$$\alpha = \exp[1.76 - (190/FC^2)], \beta = 0.99 + FC^{1.5}/1000 \quad \%5 < F.C. < \%35 \quad (6b)$$

$$\alpha = 5, \beta = 1.2 \quad F.C. \geq \%35 \quad (6c)$$



Şekil 5. Büyüklüğü 7.5 deprem için temiz ve siltli kumlarda düzeltilmiş SPT(N) -CSR abağı (Youd ve ark.,2001)

Deprem büyüklüğünün $M_w=7.5$ 'den farklı olması ve zeminin deprem öncesinde başlangıç statik kayma gerilmelerine maruz kalması durumları için, tekrarlı direnç oranı Denklem (7)'deki gibi ifade edilir.

$$CRR_{M,\sigma'_v} = CRR_{7.5} \times C_M \times K_\sigma \times K_s \quad (7)$$

Denklem (7)'de; C_M Denklem (8)'de tanımlanan deprem magnitudü düzeltme faktörüdür. K_σ örtü basıncı düzeltme faktörü olup Denklem (9)'da verilmiştir. Denklem (9)'daki f ifadesi zeminin rölatif sıkılığına bağlı 0.6 ile 0.8 arasında bir değerdir (Youd ve ark.,2001). K_s düzeltme faktörü ise başlangıç statik kayma gerilmesinin etkisini hesaba katan bir parametre olup günümüzde genellikle ihmal edilir.

$$C_M = (M_w / 7.5)^{-2.56} \quad (8)$$

$$K_\sigma = (\sigma'_v / 100)^{f-1} \quad (9)$$

Sıvılaşmaya karşı güvenlik koşulu (FS_L) ise Denklem (10)'daki gibi tanımlanır.

$$FS_L = \frac{CRR_{M,\sigma_v}}{CSR} = \frac{\tau_R}{\tau_{deprem}} \geq 1.10 \quad (10)$$

2.3. Doygun kum zeminlerde sıvılaşma kaynaklı oturma hesapları

Deprem gibi dinamik yüklerin etkisiyle kumlu zeminlerde meydana gelen sıvılaşma nedeniyle oluşan oturma (mm) için genel Denklem (11)'de verilmiştir.

$$S_d = ((\Delta H/H\%)/100)100h \quad (11)$$

Burada hacimsel birim deformasyon ($\Delta H/H\%$) sıvılaşma güvenlik katsayısı ile SPT veya Dr (bağıl sıkılık) bağılı olarak (Ishihara ve Yoshimine, 1992) yaklaşımı ile belirlenebilmektedir. Bağlıntıdaki h ise metre olarak sıvılaşan tabaka kalınlığıdır.

3..SoilEngineering: A Microsoft Excel® spreadsheet© programı ile sıvılaşma sonrası oturma analizi

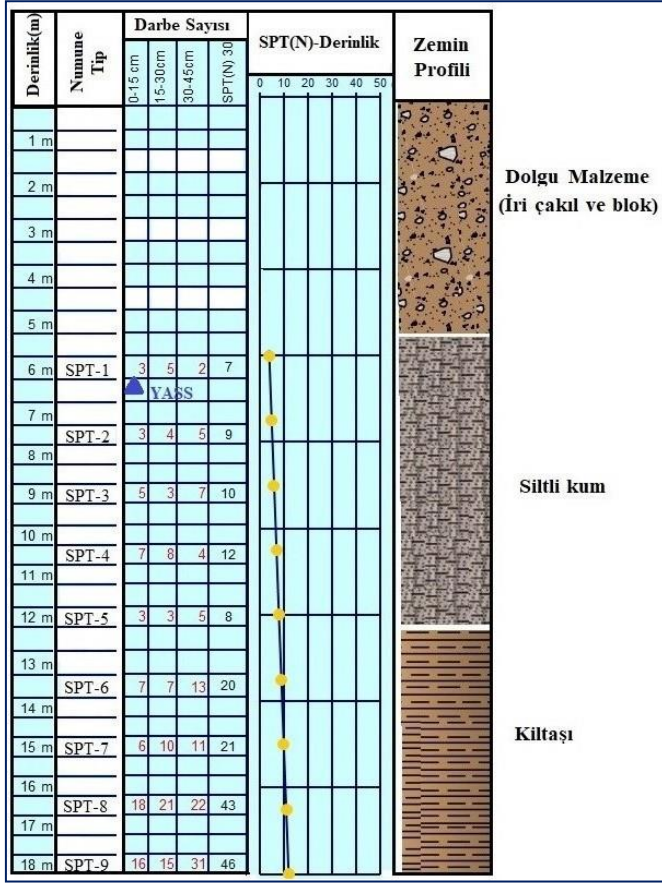
Bu çalışmada sıvılaşma analiz hesaplamaları, Özçep (2010) tarafından geliştirilen SoilEngineering programı (Şekil 6) kullanılarak yapılmıştır. SoilEngineering; özellikle Türkiye'deyaygın olarak zeminlerin geoteknik ve jeofiziksel analizi için kullanılan, ücretsiz erişime sahip Microsoft Excel® tabanlı bir programdır. Zeminlerin statik ve dinamik yükler altında geoteknik ve jeofiziksel analizinde kullanım olarak oldukça pratiktir. Bu program ile geoteknik araştırmalarda zemin problemleri analizleri kolaylıkla gerçekleştirilebilir. Bununla birlikte bu programı, kullanılan verileri sayısal olarak hesaplaması ve sonuçları görsel grafikler ile sunması avantajlı kılmaktadır. Bu çalışmada tasarlanan bir saha modeli için (Şekil 6) A Microsoft Excel® spreadsheet© programı kullanılarak, Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) yöntemine göre, sıvılaşma sonrası oturma analizleri gerçekleştirilmiştir. Muhtemel sıvılaşma beklenen sahada 7.2 ve 6.2 deprem büyüklüklerinde maksimum yüzey ivmesi 0.34g alınarak sıvılaşma sonrası oturma analizleri yapılmıştır. Saha modeli düşey yöndeki zemin kesitinde 0.0–5.0 m aralıklarında katı atıklardan oluşmuş güncel dolgu, 5.0-12.0 m aralıklarında siltli kumlar ve 12.0-20.0 m aralıklarında kilaşı hakimdir. Yeraltı su seviyesi 6. metrededir (Şekil 7). SoilEngineering: A Microsoft Excel® spreadsheet© programı sıvılaşma analiz bilgisayar programında sondaj kuyusuna ait istenen arazi ve laboratuvar deney verileri girilerek analizler tamamlanmıştır. Standart Penetrasyon Test (SPT-N) tekniği uygulanarak yapılan analizlerde kullanılan parametreler Tablo 2'de sunulmuştur. Bununla birlikte Standart Penetrasyon Test (SPT-N)'e göre yapılan sıvılaşma analizlerinde, zeminin kayma gerilmesi (τ_R) ve deprem kayma gerilmesi (τ_{deprem}) oranlanmasıyla güvenlik koşulu (FS_L) elde edilmiştir.

M o d ü l l e r	
Jeofizik (Sismik) Kırılma Verisi Jeofizik (Elektrik) Verisi Sondaj ve SPT Verisi Laboratuvar Verileri	Verilerin Hazırlanması
Jeofizik Veri & Geoteknik Parametreler Vs Hızı & SPT ilişkisi	Parametreler
Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018) Saha & Laboratuvar Deneyleri ile Zemin Özellikleri	Zemin Özellikleri
Sığ ve Derin Temeller için Taşıma Gücü Oturma Analizi (Statik&Dinamik) Yatak Katsayısının Belirlenmesi Şev/Yamaç Stabilitate Analizi Deprem Tehlike Analizi İvme Azalım ilişkisi Spektral İvme Analizi İvme / Hız / Yerdeğiştirme Spektrumları Zemin Büyütme Analizi Zemin Sıvılaşma Analizi	Zemin Problemlerinin (Statik ve Dinamik Yüklerle) Analizi

Şekil 6. SoilEngineering: A Microsoft Excel® spreadsheet© programı(Özçep, 2010)

Tasarlanan saha modelinde, 7.2 büyüklüğünde maksimum yüzey ivmesi 0.34g alınarak Standart Penetrasyon Testine (SPT-N) göre yapılan sıvılaşma analizlerinde; yaklaşık 6.3-12.3 m arasındaki derinlikten elde edilen güvenlik koşulu (FS_L) değerleri (Tablo3)0.38-0.53 aralığında; Yapılan iki analize göre; güvenlik koşulu (FS_L) değerlerinin belirtilen derinliklerde 1.1'den küçük olması sebebiyle sıvılaşma riski olabileceğini göstermektedir.

Tasarlanan saha modelinde, 6.2 büyüklüğünde maksimum yüzey ivmesi 0.34g alınarak Standart Penetrasyon Testine (SPT-N) göre yapılan sıvılaşma analizlerinde; yaklaşık 6.3-12.3 m arasındaki derinlikten elde edilen güvenlik koşulu (FS_L) değerleri (Tablo4)0.82-1.04 aralığındadır. Bununla birlikte, sadece yaklaşık 10.8 m derinlikte elde edilen güvenlik koşulu (FS_L) değeri 1.14 olduğundan bu derinlikte sıvılaşma meydana gelmemiştir. Yapılan iki analize göre; güvenlik koşulu (FS_L) değerlerinin belirtilen derinliklerde 1.1'den küçük olması sebebiyle sıvılaşma riski olabileceğini göstermektedir.



Şekil 7. Tasarlanan saha modelinin SPT-N değerleri ve zemin profili

Tablo 2. Tasarlanan saha modeli için SoilEngineering sınıvlaşma analizi programının girdi veri tablosu: Çevrimsel kayma direnci (CSR)(D) ve kayma gerilmesi (τ_{deprem}) sonuçları ($M_w=7.2$)

Derinlik (m)	Birim hacim ağırlık γ (gr/cm ³)	İnce tane içeriği (FC)	Örtü yükü gerilmesi σ_v (kPa)	Efektif gerilme σ_v' (kPa)	Su içeren tabaka kalınlığı l (m)	Gerilme azaltma faktörü (r_d)	Çevrimsel kayma direnci (CSR)(E)	Kayma gerilmesi (τ_{deprem})
6.3	1.92	7	111.2	108.3	0.30	0.955135	0.217	22.1009
7.8	1.92	9	139.5	121.8	1.80	0.939701	0.238	27.2660
9.3	1.91	6	167.6	135.2	3.30	0.917944	0.251	32.0010
10.8	1.93	10	196.0	148.9	4.80	0.887565	0.258	36.1850
12.3	1.90	8	224.0	162.2	6.30	0.847893	0.259	39.4984

Tablo 3. Tasarlanan saha modeli için standart penetrasyon testi (SPT) analizini gösteren SoilEngineering sınıflama analizi programının girdi veri tablosu: Kayma direnci oranı (CRR) (Z) ve güvenlik koşulu (FS_L) sonuçları ($M_W=7.2$)

Derinlik (m)	Araziden elde edilmiş ham SPT(N) darbe sayısı	Örtü yükü düzeltme (derinlik) katsayısı, (C_N)	Enerji verimliliği (oranı) düzeltme katsayısı, (C_E)	Sondaj delgi çapı düzeltme katsayısı, (C_B)	Numune alıcı tipi düzeltme katsayısı, (C_S)	Tij boyu düzeltme katsayısı (C_R)	Düzeltilmiş SPT darbe sayısı ($N_{1(60)}$)	Kayma direnci oranı (CRR)(S)	Güvenlik Koşulu (FS_L)
6.3	7	0.95	0.75	1.0	1.1	0.85	4.8	0.0786	0.43
7.8	9	0.90	0.75	1.0	1.1	0.95	7.0	0.0972	0.48
9.3	10	0.85	0.75	1.0	1.1	0.95	6.7	0.0949	0.44
10.8	12	0.81	0.75	1.0	1.1	1.00	9.1	0.1165	0.53
12.3	8	0.78	0.75	1.0	1.1	1.00	5.5	0.0841	0.38

Tablo 4. Tasarlanan saha modeli için standart penetrasyon testi (SPT) analizini gösteren SoilEngineering sınıflama analizi programının girdi veri tablosu: Kayma direnci oranı (CRR) (Z) ve güvenlik koşulu (FS_L) sonuçları ($M_W=6.2$)

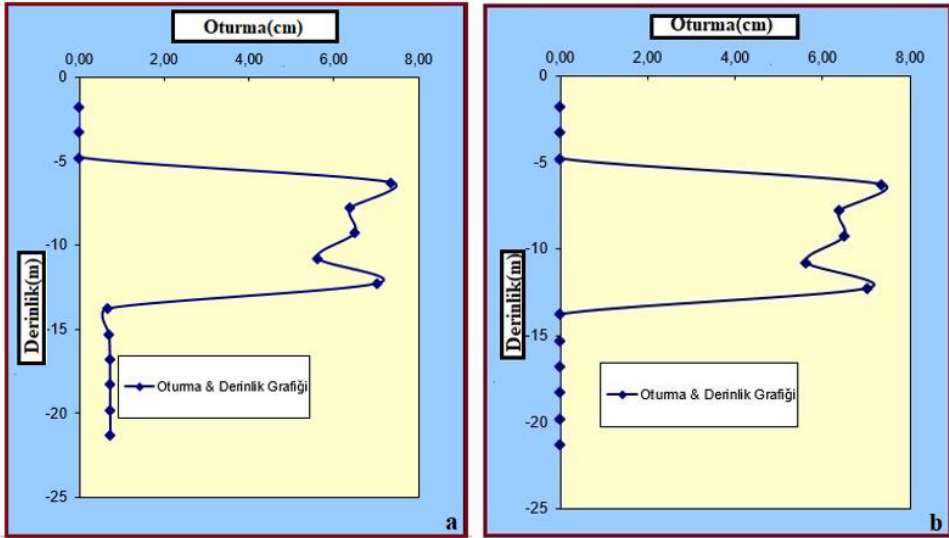
Derinlik (m)	Arazide n elde edilmiş ham SPT(N) darbe sayısı	Örtü yükü düzeltme (derinlik) katsayısı, (C_N)	Enerji verimliliği i (oranı) düzeltme katsayısı, (C_E)	Sondaj delgi çapı düzeltme katsayısı, (C_B)	Numune alıcı tipi düzeltme katsayısı, (C_S)	Tij boyu düzeltme katsayısı (C_R)	Düzeltilmiş SPT darbe sayısı ($N_{1(60)}$)	Kayma direnci oranı (CRR)(S)	Güvenli k Koşulu(FS_L)
6.3	7	0.95	0.75	1.0	1.1	0.85	4.8	0.1152	0.92
7.8	9	0.90	0.75	1.0	1.1	0.95	7.0	0.1425	1.04
9.3	10	0.85	0.75	1.0	1.1	0.95	6.7	0.1391	0.96
10.8	12	0.81	0.75	1.0	1.1	1.00	9.1	0.1709	1.14
12.3	8	0.78	0.75	1.0	1.1	1.00	5.5	0.1233	0.82

Tasarlanan saha modelinde, 7.2 deprem büyüklüğü, maksimum yüzey ivmesi 0.34g'de Ishihara ve Yoshimine (1992) yöntemine göre, yapılan analizlerde, 6.3-12.3 m derinlikler arasında 32.81 cm, ve 37.06 cm toplam oturma miktarları hesaplanmıştır. Sınıflama analiz sonuçlarına göre $M_W=7.2$ ve 0.34 g yer ivmesi için meydana gelebilecek toplam oturmalar 0.66 cm ile 7.34 cm (Tablo5) arasında değişmektedir. Tasarlanan saha modeli için açılan sondaj kuyusunda yaklaşık 6.3-12.3 m derinliklerde sınıflama riski potansiyeli yüksek ve buna paralel olarak bu derinliklerdeki zemin tabakalarında yüksek miktarlarda oturmalar olabileceği görülmektedir. Tasarlanan saha modelinde, 6.2 deprem büyüklüğü, maksimum yüzey ivmesi 0.34g'de Ishihara ve Yoshimine (1992) yöntemine göre, yapılan analizlerde, 6.3-12.3 m derinlikler arasında 32.81 cm ve 32.81 cm toplam oturma miktarları hesaplanmıştır. Sınıflama analiz sonuçlarına göre $M_W=6.2$ ve 0.34 g yer ivmesi için olası toplam oturmalar 5.60 cm ile 7.34 cm (Tablo5) arasında değişiklik

göstermektedir. Tasarlanan saha modeli için açılan sondaj kuyusunda yaklaşık 6.3-12.3 m derinliklerde sıvılaşma riski potansiyeli yüksek ve buna paralel olarak bu derinliklerdeki zemin tabakalarında yüksek miktarlarda oturmalar (Şekil 8a ve Şekil 8b)olabileceği görülmektedir.

Tablo 5.Tasarlanan saha modeli için, Mw=7.2 ve Mw=6.2 deprem büyüklüklerine göre derinlikle oturma miktarları sonuçları

Derinlik(m)	Mw=7.2 Oturma(cm)	Mw=6.2 Oturma(cm)
6.3	0.00	0.00
1.8	0.00	0.00
3.3	0.00	0.00
4.8	7.34	7.34
6.3	6.38	6.38
7.8	6.48	6.48
9.3	5.60	5.60
10.8	7.01	7.01
12.3	0.66	0.00
13.8	0.70	0.00
15.3	0.72	0.00
16.8	0.72	0.00
18.3	0.72	0.00
19.8	0.73	0.00



Şekil 8. Saha modeli için: a)Mw=7.2 b)Mw=6.2 deprem büyüklüklerine göre derinlik- oturma değişimleri

SONUÇLAR

Bu çalışmada, sıvılaşma sonrası meydana gelen oturma miktarının belirlenmesi amacıyla Ishihara ve Yoshimine (1992) tarafından önerilen yaklaşım gözönünde bulundurulmuştur. Tasarlanan bir saha modeli için, farklı deprem büyüklükleri kullanılarak yapılan hesaplamalar SoilEngineering: A Microsoft Excel® spreadsheet© programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sıvılaşma sonucu meydana gelecek oturmalar Ishihara ve Yoshimine (1992) yöntemine göre $M_w=7.2$ ve $M_w=6.2$ büyüklüğündeki depremler için belirlenmiştir. $M_w=7.2$ ve bu büyüklükteki bir depremde beklenen $a_{max}=0.34$ g için yapılan analizlerde, 6.3-12.3 m derinlikler arasında 32.81 cm, ve 37.06 cm toplam oturma miktarları tespit edilmiştir. $M_w=6.2$ ve bu büyüklükteki bir depremde beklenen $a_{max}=0.34$ g için yapılan analizlerde, 6.3-12.3 m derinlikler arasında 32.81 cm, ve 32.81 cm toplam oturma miktarları hesaplanmıştır. Sonuç olarak, depremler gibi dinamik yüklerin neden olduğu sıvılaşma sonrası oturma hasarlarının ne denli önemli olduğu vurgulanmıştır.

KAYNAKLAR

- Castro, G. (1975). Liquefaction and cyclic mobility of saturated sands. Journal of the geotechnical engineering division, 101(6), 551-569.
- Celep Z. ve Kumbasar N., 2000, Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı, İstanbul.
- Ishihara, K., & Yoshimine, M. (1992). Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes. Soils and foundations, 32(1), 173-188.
- Ozcep, F. (2010). SoilEngineering: A Microsoft Excel® spreadsheet© program for geotechnical and geophysical analysis of soils. Computers & Geosciences, 36(10), 1355-1361.
- Seed, H. B., & Idriss, I. M. (1971). Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. Journal of the Soil Mechanics and Foundations division, 97(9), 1249-1273.
- Seed, H. B., Wong, R. T., Idriss, I. M., & Tokimatsu, K. (1986). Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils. Journal of geotechnical engineering, 112(11), 1016-1032.
- Seed, H.B., Tokimatsu, K., Harder, L. F., & Chung, R. M. (1985). Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations. Journal of geotechnical engineering, 111(12), 1425-1445.
- Stokoe, K. H., Roesset, J. M., Bierschwale, J. G., & Aouad, M. (1988, August). Liquefaction potential of sands from shear wave velocity. In Proceedings, 9nd World Conference on Earthquake (Vol. 13, pp. 213-218).
- TBDY (2018). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. Ankara: Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı
- Tsukamoto, Y., & Ishihara, K. (2010). Analysis on settlement of soil deposits following liquefaction during earthquakes. Soils and Foundations, 50(3), 399-411.
- Uyanık, O., 2002, Kayma Dalgası Hızına bağlı Potansiyel Sıvılaşma Analizi, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeofizik Müh. Anabilim Dalı, İzmir.
- Youd, T. L., & Idriss, I. M. (2001). Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1. Geotechnical and Geoenvironmental Eng. In ASCE (Vol. 127, No. 10, pp. 817-33).
- Department of Civil Engineering- University of Washington, When has Liquefaction occurred in the past, <https://depts.washington.edu/liquefy/html/quakes/niigata/niigata.html> Erişim Tarihi: 30.03.2025



Modern Seraların İnşaatının Proje Yönetim Yazılımları ile Planlanması

Hüseyin Yıldırım Dalkılıç¹ & Semiha Şeyma Bozbek²

¹ Doç. Dr., Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, ORCID:0000-0002-4405-9341

² Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzincan, TÜRKİYE, ORCID: 0009-0009-8600-7943

1.GİRİŞ

Günümüzde ülkelerin ekonomik büyümelerinde en büyük pay tarım, sanayi ve inşaat sektörlerine aittir. Bu sektörler arasında ise inşaat sektörü, aldığı pay bakımından öne çıkmaktadır (Kömürlü ve Toltar, 2018). İnşaat sektörü; yollar, köprüler, barajlar, hastaneler, konutlar, enerji tesisleri, fabrikalar, altyapılar ve tarım yapıları (ahırlar, depo tesisleri, seralar) gibi birçok yapının üretimiyle yaşam çevresini şekillendiren temel sektörlerden biridir. Ayrıca Türkiye’de inşaat sektörü, son yıllarda artan oranda uluslararası sözleşmeler üstlenmeye başlamıştır (Bilgin, Bilgin, Dikmen ve Birgonul, 2019).

İnşaat sektörü; projelerin özgün yapısı, çok disiplinli çalışma gerektirmesi, zaman-maliyet-kalite kısıtlamaları ve yüksek risk barındırması nedeniyle diğer sektörlerle kıyasla daha zorlu bir yapıya sahiptir (Elbeltagi, 2009). Üstelik inşaat projeleri çoğu zaman öngörülemeyen koşullar altında yürütülmektedir. Eshtehardian ve arkadaşları (2009), değişken hava ve saha koşulları, ekipman arızaları, geciken malzeme teminleri ve düşük iş gücü verimliliği gibi belirsizliklerin projeleri olumsuz etkilediğini belirtmiştir. Bu karmaşık yapı nedeniyle inşaat projelerinin etkin bir şekilde yönetilmesi ve başarıya ulaşması, proje yönetimi disiplininin uygulanmasını zorunlu kılmaktadır (Kömürlü ve Toltar, 2018).

Proje yönetimi, planlı bir yaklaşımın yokluğunda projelerin başarıyla tamamlanamayacağını anlaşılmaya son on yıl içerisinde daha da önem kazanmıştır. Bu disiplinin temel amacı; projelerin planlanan süre, maliyet ve kalite hedeflerine uygun şekilde tamamlanmasını sağlamaktır (Newton, 2006).

Öte yandan, dünya ve Türkiye’de artan nüfusla birlikte doğal kaynaklara, özellikle de tarımsal kaynaklara olan ihtiyaç giderek artmakta, bu durum mevcut kaynaklar üzerindeki baskıyı artırmaktadır. Artan nüfusun gıda ihtiyacını karşılayabilmek, ancak tarımsal üretimde verimliliğin artırılmasıyla mümkündür (Şahin ve Kendirli, 2012)

Bu çerçevede, iyi tarım uygulamaları ve sürdürülebilir tarım anlayışları önem kazanmıştır. Türkiye’de tarıma elverişli alanlar sınırına ulaşmış, hatta sanayileşme baskısıyla bu alanlarda daralma yaşanmaya başlamıştır (Tuğay, 2012). Ayrıca yoğun tarım faaliyetleri, toprağın fiziksel ve kimyasal yapısının bozulmasına, organik madde kaybına ve bunun sonucunda bitkisel üretimin düşmesine yol açmaktadır (Kızıloğlu vd., 2011). Bu nedenle, su ve toprak gibi doğal kaynakların sürdürülebilir kullanımı büyük önem taşımaktadır. Tarımsal üretimi artırmanın etkili yollarından biri olarak modern seraların yaygınlaştırılması ve teşvik edilmesi gerekmektedir.

İnşaat ve tarım sektörlerinin ülke ekonomisindeki önemi göz önünde bulundurulduğunda, bu alanlarda yürütülen projelerin belirlenen süre, maliyet ve kalite hedefleri doğrultusunda tamamlanabilmesi için koordineli bir çalışma gereklidir (Kömürlü ve Toltar, 2018). Seralar, birim alandan yüksek verim

alınmasını sağlayarak küçük alanların etkin şekilde değerlendirilmesine olanak tanır. Ayrıca yıl boyunca düzenli iş gücü kullanımı sağladığından, Türkiye’de en önemli tarımsal faaliyetlerden biri hâline gelmiştir (Sevgican vd., 2000).

Bu çalışmada, inşaat sektöründe yaygın olarak kullanılan Primavera yazılımının modern örtü altı tarım yapılarının (sera inşaatlarının) planlanması ve yönetiminde ne derece etkili olduğu ortaya konulmuştur. Bu kapsamda, Primavera ile proje yönetimi süreçlerinin nasıl planlandığı ve sahaya nasıl uygulandığı araştırılmış; proje yönetimi literatürü incelenmiştir. Ayrıca, proje yönetim metodolojileri ve teknikleri değerlendirilmiş, proje yönetiminin süreçleri ve bilgi alanları ele alınarak bu unsurların proje başarısına olan etkileri tartışılmıştır. Son olarak Primavera uygulamasıyla yürütülen bir sera projesi, yazılım kullanılmadan tamamlanan başka bir sera projesiyle karşılaştırılarak sonuçlar değerlendirilmiştir.

2.PROJE YÖNETİMİ

Proje yönetimi, küçük ölçekli çalışmalardan küresel çaplı projelere kadar tüm projelerde ihtiyaç duyulan planlama ve organizasyon süreçlerinin bütünüdür. Özellikle inşaat sektöründe, projelerin etkin bir şekilde planlanması, yürütülmesi ve denetlenmesi gereksinimi, proje yönetimi disiplininin gelişmesine zemin hazırlamıştır (Kömürlü ve Kuzu, 2022).

Proje yönetimi; süre, maliyet, kapsam ve kalite hedeflerine ulaşmayı amaçlayan, kaynakların çeşitli teknik ve yöntemler doğrultusunda etkin kullanımını sağlayan sistematik bir süreç olarak tanımlanabilir (Kömürlü ve Toltar, 2018). Bu süreç, proje organizasyonundaki tüm paydaşların faaliyetlerini koordine etmeyi, uygulamayı ve denetlemeyi kapsar.

Ayrıca, proje yöneticisi ya da proje yönetim birimi, işverenin hedeflerini verimli bir şekilde gerçekleştirme sorumluluğunu üstlenir. Bu kapsamda proje yönetimi, projelerin belirlenen sürede, bütçe çerçevesinde ve istenilen kalite standartlarında tamamlanmasını hedefler (Kolaylıoğlu, 2006).

Literatürde proje yönetiminin sistematik bir disiplin olarak gelişimi 20. yüzyılın ortalarına dayansada, özellikle Türkiye’de son yıllarda artan büyük ölçekli projelerle birlikte önemi daha çok anlaşılmış ve uygulamaya alınmıştır (Newton, 2006).

2.1. Proje Yönetim Evreleri

Proje yönetimi, birbirini takip eden beş temel evreden oluşur. Bu evreler, projenin başlangıcından tamamlanmasına kadar olan süreci sistematik şekilde yönetmeyi amaçlar.

a. BaşlatmaAşaması:

Bu aşama, projenin tanımlandığı ve fizibilite analizlerinin yapıldığı ilk evredir. Yapılan değerlendirmelerde; projenin organizasyonel yapısı, gerekli kaynaklar, olası

maliyetler ve teknik uygulanabilirliği analiz edilir. Bu analizler sonucunda stratejik hedeflere uygun olmayan projeler elenir ve uygulamaya alınmaz (Coşkun ve Ekmekçi, 2020).

b. PlanlamaAşaması:

Projenin başarısı büyük ölçüde planlama sürecine bağlıdır. Bu aşamada proje kapsamı, hedefler, iş paketleri, zaman çizelgesi ve kaynak planlaması detaylandırılır. “Ne, ne zaman, nerede, kim tarafından ve nasıl?” gibi sorulara yanıt aranır (Burlton, 2001). Tüm paydaşlar arasında iletişim sağlanarak ortak bir anlayış geliştirilir (Kerzner, 2003).

c. UygulamaAşaması:

Uygulama evresinde, planlanan faaliyetler sahada hayata geçirilir. Bu aşama, projenin fiziksel çıktılarının üretildiği dönemdir. Eylem planı doğrultusunda ekipler görevlerini yerine getirir, kaynaklar kullanılır ve ilerleme izlenir.

d. İzlemeveKontrolAşaması:

Bu süreçte, projenin performansı düzenli olarak değerlendirilir ve planla karşılaştırmalar yapılır. Sapmaların nedenleri analiz edilir; zaman, maliyet ve kalite unsurları dikkate alınarak gerekli düzeltici önlemler alınır. Proje gerekirse revize edilir ve yeniden planlanarak uygulamaya devam edilir (Kömürlü ve Kuzu, 2022).

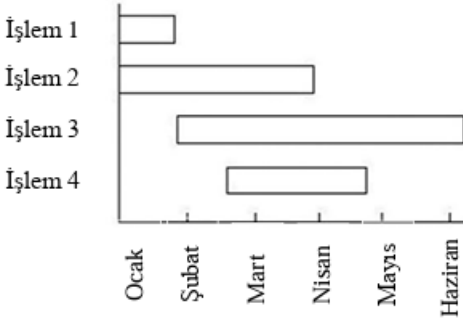
e. KapanışAşaması:

Proje hedeflerinin ne ölçüde gerçekleştiği değerlendirilir. Faaliyetlerin tamamlandığı bu evrede, proje çıktıları teslim edilir, varsa eksiklikler kapatılır ve proje resmen sona erdirilir. Proje süreci analiz edilerek gelecek projeler için dersler çıkarılır.

Bu evreler ardışık şekilde tanımlansa da, uygulamada evreler arasında kesin sınırlar bulunmayabilir. Süreçler çoğu zaman birbirini tamamlayıcı nitelikte işler (Kömürlü ve Kuzu, 2022).

2.2.ÇUBUK (GANTT) DİYAGRAMI

Henry Gantt, 1910’lu yıllarda iş süreçlerinin zamanlamasını ve sıralamasını sistematik şekilde analiz ederek, bugün proje yönetiminde sıkça kullanılan “Gantt Diyagramı”nı geliştirmiştir. Gantt Diyagramı (veya Gantt Çizelgesi), bir projenin görevlerini ve bu görevlerin zaman içindeki dağılımını çubuk grafikler (barlar) aracılığıyla görselleştiren bir planlama aracıdır. Bu görsel yöntem, hem proje yöneticileri hem de diğer paydaşlar tarafından kolayca anlaşılabilirdiği için proje takviminin oluşturulmasında yaygın biçimde kullanılmaktadır (Watt, 2013). Örnek bir Gantt çizelgesi Şekil 2.2’de sunulmuştur.



Şekil 1. Örnek bir Gantt Diyagramı (PMBOK, 2000).

Bu yöntemin en büyük avantajlarından biri, karmaşık projelerin görsel olarak sadeleştirilerek tüm paydaşların proje ilerleyişini kolayca anlayabilmesidir. Gantt diyagramları günümüzde dijital yazılımlar aracılığıyla (örn. Microsoft Project, Primavera, etc.) otomatik olarak oluşturulmakta ve sürekli güncellenebilir yapısıyla dinamik proje yönetimini desteklemektedir.

2.3. CPM-KRİTİK YOL METODU (CRITICAL PATH METHOD)

Kritik Yol Yöntemi (CPM), bir projenin faaliyetlerini ve bu faaliyetler arasındaki ilişkileri sistematik bir şekilde ortaya koyan belirli bir planlama ve zamanlama tekniğidir. CPM, yalnızca projenin tamamlanma süresini belirlemekle kalmaz, aynı zamanda proje sürecinin yönetimi sırasında hangi faaliyetlerin öncelikli olarak ele alınması gerektiğine dair yönlendirici bilgiler sunar (Tolunay ve Çavuşolu, 2015).

Ayrıca, faaliyetler arası bağımlılıkların ve kritik yolların belirlenmesine olanak tanıyarak, zaman yönetimi açısından önemli katkıları sağlar (Meredith & Mantel, 2011).

Kritik Yol Yöntemi, uygulamadaki pratikliği sayesinde geliştirilmesinden bu yana karmaşık projelerin planlanması, zaman çizelgelerinin oluşturulması ve proje kontrol faaliyetlerinde etkin biçimde kullanılan önemli bir araçtır. Bu yöntemeye dayalı olarak geliştirilen çözüm modelinin temel amacı, projenin tamamlanma süresinin belirlenmesidir. Söz konusu yöntemde, çözüm modeli; ağ yapısı üzerinde kritik yolların, kritik faaliyetlerin ve kritik olayların tanımlanmasına dayanmaktadır (Chanas ve Zielinski, 2001).

Bir proje yönetim yazılımı olan primavera programı, projenin aktivitelerini oluşturup, gantt diyagramını, kritik yolu ve aktiviteler arası ilişkiyi ortaya koyar.

3.SERALAR

Seralar, iklim koşullarını kontrollü bir şekilde düzenleyerek, yılın tamamında çeşitli kültür bitkileri ile bunlara ait tohum, fide ve fidanların üretiminin gerçekleştirilmesini sağlayan, ışık geçirgenliğine sahip cam veya plastik gibi malzemelerle kaplanmış, yüksek yapısal sistemlerdir. Sera yetiştiriciliği, dış mekân koşullarında yapılan tarıma kıyasla, kontrollü çevre şartlarında birim alandan daha yüksek verim elde etmeyi amaçlayan ve bu doğrultuda daha fazla girdi kullanılarak üretim kapasitesini artırmayı hedefleyen modern bir tarım uygulamasıdır.

Ayrıca modern seralarda ısıtma, havalandırma, gübreleme ve sulama otomasyon sistemleri ile gerçekleştirilir (Kadıoğlu, 2013).

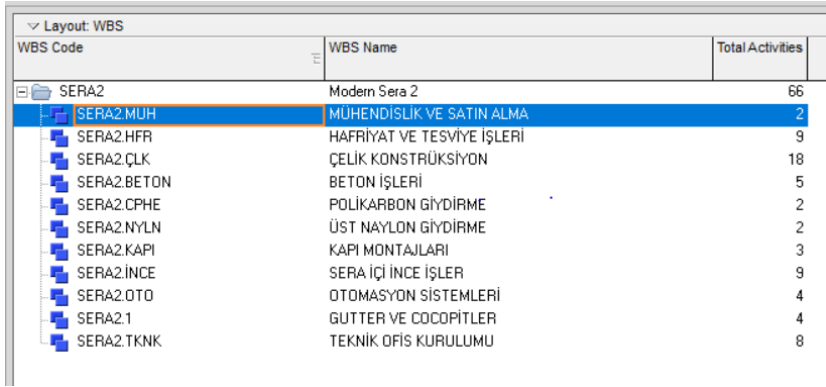
Türkiye'de seracılık faaliyetleri, 1940-1960 yılları arasında Antalya ve İzmir'de kurulan sınırlı sayıdaki ticari seralarla başlamıştır. 1970'li yıllarda polietilenin örtü malzemesi olarak kullanımına geçilmesi, seracılık sektörünün gelişimini hızlandırmıştır. Bu gelişmelerin sonucunda, 1970 yılından itibaren Türkiye'de seracılık önemli bir ivme kazanmıştır. Nitekim, 1995 yılında 363.042 dekara ulaşan sera alanı, 2017 yılı itibarıyla 752.167,6 dekara çıkarak yaklaşık iki kat artış göstermiştir (TÜİK, 2019).

1990'lı yıllardan itibaren ise ileri teknoloji kullanımına geçilmiş; modern seraların kurulması ve topraksız tarım uygulamalarının yaygınlaşmasıyla sektör daha da gelişmiştir. Günümüzde seracılık faaliyetleri bakımından Akdeniz Bölgesi ilk sırada yer almakta, onu Ege Bölgesi izlemektedir. Tarımsal üretimin yıl boyunca sürdürülebilirliğini sağlayan sera yetiştiriciliğinde, Antalya ili en öncelikli konuma sahiptir (Karkacier, 2020).

4. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmanın kapsamı Erzincan İli Merkez İlçesi Akyazı/Aktoprak mevkiinde yapılacak olan 29.040 m² jeotermal modern sera inşaatının, anahtar teslim sözleşmesinde yazan bitiş tarihinde teslim edilebilmesi için proje yönetim yazılımı olan Primavera ile planlanıp, yönetilmesidir. Ayrıca çalışmanın sonuçları yine aynı firmaya ait olan Yozgat İlinin Sorgun ilçesindeki jeotermal modern seranın inşaat süresi ile karşılaştırılmıştır.

Bu çalışmada, modern seraların planlama süreçlerini optimize etmek amacıyla Primavera P6 proje yönetim yazılımı kullanılmıştır. Araştırma, nitel ve nicel yöntemlerin bir arada kullanıldığı karma yöntem yaklaşımı ile yürütülmüştür. Uygulama kapsamında örnek bir modern sera inşaat projesi ele alınmış ve proje planlaması Primavera P6 üzerinden gerçekleştirilmiştir.



WBS Code	WBS Name	Total Activities
SERA2	Modern Sera 2	66
SERA2.MUH	MÜHENDİSLİK VE SATIN ALMA	2
SERA2.HFR	HAFRIYAT VE TESVİYE İŞLERİ	9
SERA2.ÇLK	ÇELİK KONSTRÜKSİYON	18
SERA2.BETON	BETON İŞLERİ	5
SERA2.CPHE	POLİKARBON GİYDİRME	2
SERA2.NYLN	ÜST NAYLON GİYDİRME	2
SERA2.KAPI	KAPI MONTAJLARI	3
SERA2.İNCE	SERA İÇİ İNCE İŞLER	9
SERA2.OTO	OTOMASYON SİSTEMLERİ	4
SERA2.1	GUTTER VE COCOPİTLER	4
SERA2.TKNK	TEKNİK OFİS KURULUMU	8

Şekil
2.

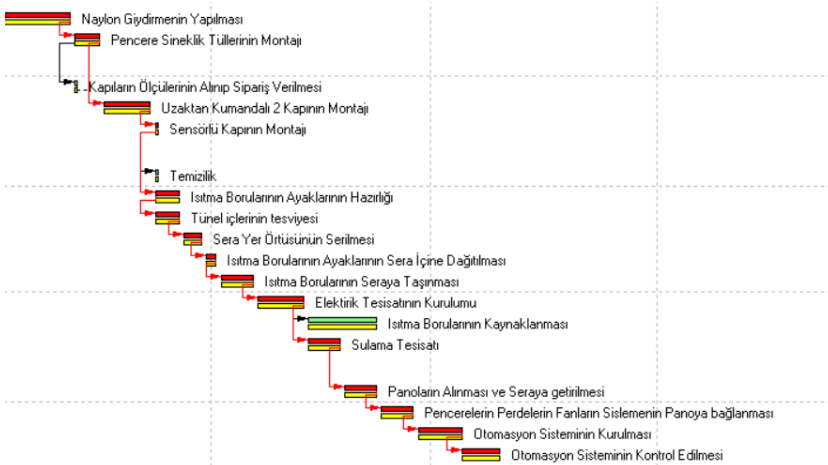
Projenin Primavera'da WBS(work break structure) Görünümü

WBS (work break structure) projede yapılacak işlerin, ürün ve çıktı perspektifinden hiyerarşisini ifade eder. Şekil 2' de de görüldüğü gibi programda ilk olarak projenin WBS leri oluşturulmuştur. WBS lerin isimleri ise iş paketlerini ifade eder.

FB1010	Tasarım Gözden Geçirme ve Onay	30-Sep-23	09-Oct-23	10d
HAFRIYAT VE TESVİYE İŞLERİ		10-Oct-23	02-Dec-23	54d
FB1020	Mobilizasyon	10-Oct-23	03-Nov-23	25d
FB1030	İnşaat Başlangıcı	04-Nov-23		0d
FB1040	Sahadaki Otların Temizlenmesi	04-Nov-23	05-Nov-23	2d
FB1045	Dolgular ve Sıkıştırma	06-Nov-23	10-Nov-23	5d
FB1050	Tesviye	11-Nov-23	20-Nov-23	10d
FB1060	Sera Köşe Noktalarının Belirlenmesi	21-Nov-23	21-Nov-23	1d
FB1070	Ankraj Yerlerinin Belirlenmesi	22-Nov-23	25-Nov-23	4d
FB1080	Ankraj Deliklerinin Kazılması	26-Nov-23	02-Dec-23	7d
FB1085	Malzeme Sevkiyatı ve sayımların yapılması	26-Nov-23	27-Nov-23	2d
ÇELİK KONSTRÜKSİYON		20-Sep-23	03-Feb-24	143d
FB1090	Ankrajların Betonlanması	03-Dec-23	12-Dec-23	10d
FB1100	Kolonların Ankrajlara Monte Edilmesi	13-Dec-23	17-Dec-23	5d
FB1110	Olukların Hazırlanması	18-Dec-23	19-Dec-23	2d
FB1115	Malzeme Sevkiyatı	18-Dec-23	18-Dec-23	1d
FB1120	Olukların Kolonlara Monte Edilmesi	19-Dec-23	25-Dec-23	7d
FB1130	Kolonların Çaprazlarının Aılması	26-Dec-23	29-Dec-23	4d
FB1140	Makasların Hazırlanması	26-Dec-23	01-Jan-24	7d
FB1150	Makasların Dizilmesi	02-Jan-24	11-Jan-24	10d
FB1155	Kafa Orta Kolon Bağlantısı ve Betonlu	12-Jan-24	18-Jan-24	7d
FB1160	Kafa Çaprazlarının Bağlanması	19-Jan-24	22-Jan-24	4d
FB1165	Isıtma Borularının Boyanması	23-Jan-24	29-Jan-24	7d
FB1170	45'Lik Mahya Profilinin Dizilmesi	23-Jan-24	24-Jan-24	2d
FB1180	Pencere Sisteminin Profilinin Hazırlanması	25-Jan-24	27-Jan-24	3d
FB1190	Pencere Sisteminin Kurulması	28-Jan-24	31-Jan-24	4d
FB1200	Şaft Boruları, Redüktörler ve Kremiyer Takımının Monte Edilmesi	01-Feb-24	04-Feb-24	4d
FB1210	351 k Profilinin Pencere Sisteminin Monte Edilmesi	05-Feb-24	08-Feb-24	4d

Şekil 3. Aktivite Listesi

Daha sonrasında projenin aktiviteler programa girilir. Şekil 3'te görüldüğü üzere aktiviteler programa girilmiş ve her aktivite için zaman aralıkları verilmiştir. Daha sonrasında bu aktiviteler arasında birbirlerinin öncül veya ardıl ilişkisi tanımlanıp, projenin CPM (critical path method) oluşturulmuştur.



Şekil 4. Projenin CPM Görünümü

Projenin Şekil 4’te görüldüğü üzere CPM belirlenip, inşaat aşamasına geçilmiştir. Ve program inşaat sahasına uygulanmıştır.



Resim 1. Erzincan Akyazı Modern Sera İnşaat sahasında kolonların montajı

İnşaat sahasındaki aktivitelerin süreleri not edilip programla uyumu gözlemlenmiştir. Programdaki sürelerden fazla süren aktiviteler programa işlenmiştir ve kritik yolu etkileyip etkilemediğine bakılmıştır.

5. SONUÇ

Erzincan İlinin Akyazı/Aktoprak mevkinde yapılmış olan ilk modern sera inşaatı primavera proje yönetim yazılımı sayesinde sözleşme tarihlerinde olduğu gibi Eylül 2023 ayında başlayıp Şubat 2024 ayında fide dikimine hazır hale gelmiştir.

Ayrıca aynı firmaya ait ve yine aynı boyutlardaki Yozgat/Sorgun ilçesindeki modern sera, proje yönetim programı kullanılmadan inşaat süresine baktığımız da modern sera inşası Mayıs 2019 başlayıp Aralık 2020 de bitirilmiştir. Yozgat/Sorgun daki gecikmelerden ötürü sipariş verilen fideler zamanında dikilememiş ve zayı olmuştur.

7. KAYNAKLAR

- Kolaylioğlu, Ö. (2006). İnşaat sektöründe proje yönetimi ve proje yöneticisi (Order No. 30865101). Available from ProQuest Dissertations & Theses Global. (2957136979). Retrieved from <https://www.proquest.com/dissertations-theses/inşaat-sektöründe-proje-yönetimi-ve-yöneticisi/docview/2957136979/se-2>
- Tüzel, Y., Öztekin, G. B., & Karaman, İ. (2010). Serik İlçesindeki Modern ve Geleneksel Sera İşletmelerinin Üretici Özellikleri, Sera Yapısı ve Sebze Üretim Teknikleri Bakımından Karşılaştırılması. *Journal of Agriculture Faculty of Ege University*, 47(3), 223-230.
- Kömürlü, R., & Toltar, L. (2018). İnşaat Proje Yönetimi; Projenin Başarısına Etkisi. *Mimarlık Ve Yaşam*, 3(2), 249-258. <https://doi.org/10.26835/my.488853>
- Kömürlü, R., & Kuzu, O. (2022). İnşaat Projelerinde Kullanılan Proje Yönetim Tekniklerinin Analizi. *Artium*, 10(1), 45-53. <https://doi.org/10.51664/artium.1018835>
- Kerzner, H., (2003). *Project Management A System Approach to Planning, Scheduling, and Controlling*, 8.Baskı, John Wiley & Sons Inc.,
- Meredith, J. R., & Mantel, S. J. (2011). *Project Management: A Managerial Approach* (8th ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Tolunay, A., & Çavuşoğlu, C. (2015). Devlet orman fidanlıklarında fidan üretiminin kritik yol yöntemi (CPM) ile planlanması: Fethiye Orman Fidanlık Şefliği örneği. *Turkish Journal of Forestry*, 16(1), 20-26.
- Chanas, S., Zielinski, P., 2001. Critical Path Analysis in the Network with Fuzzy Activity Times. *Fuzzy Sets and Systems*, 122(2), pp. 195-204.
- Kadioğlu, Y. (2013). SİMAV'DA JEOTERMAL SERACILIK. *Marmara Coğrafya Dergisi*, (28), 64-80.
- TÜİK. 2018. Bitkisel Üretim İstatistikleri. http://www.tuik.gov.tr/Pre_Cizelge.do?alt_id=1001; Erişim Tarihi: 04.10.2020.
- Sevgican, A., Y. Tüzel, A. Gül, ve R. Z. Eltez. 2000. Türkiye'de örtüaltı yetiştiriciliği. *Türkiye Ziraat Müh. V. Teknik Kongresi*, Ankara, Cilt II: 679-680.
- Şahin, G. & Kendirli, B. (2012). Türkiye'de örtüaltı meyve yetiştiriciliği. *Akdeniz Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 1(25), 9-15.
- Kömürlü, R.,&Toltar, L. (2018). İnşaat Proje Yönetimi; Projenin Başarısına Etkisi. *Mimarlık Ve Yaşam*, 3(2), 249-258. <https://doi.org/10.26835/my.488853>
- Newton, Richard, *Project Management Step by Step*, Pearson, Optimist Yayıncılık, 2006,S.17,107.

- Tuğay, M. E. (2012). TheWay of Increasing of AgriculturalProduction in Turkey. ReserachJournal of AgriculturalSciences(1), 1-8.
- Bilgin, G., Bilgin, P., Dikmen, I. ve Birgonul, M. (2019). Türk inşaat sektörünün inovasyonvizyonu: Stratejik yol haritalarının karşılaştırmalı nitel içerik analizi. Uluslararası İnovasyon, Teknoloji, Girişimcilik ve Girişimcilik Konferansı (ICITEE), 24-25 Kasım, Bahreyn.
- Elbeltagi, E. (2009). İnşaat Proje Yönetimi Üzerine Ders Notları. Yapı Mühendisliği Bölümü, Mansoura Üniversitesi, Mısır.
- Eshtehardian, E., Afshar, A. ve Abbasnia, R. (2009). Stokastik zaman-maliyet denge sorununa bulanık tabanlı MOGA yaklaşımı, Autom. Constr., 18(5), 692–701. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2009.02.001>
- Kızıloğlu Algan, F. T., & Bilen, S. (2011). Toprak Kirlenmesi ve Biyolojik Çevre. Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 36(1), 83-88.
- Karkacier, O. (2020). Modern ve geleneksel koşullarda seracılık için karşılaştırmalı ekonomik karlılık analizi: domates yetiştiriciliği örneği. Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology, 8(10), 2170-2174.



Geleneksel Sismik İzolatörlerin İncelenmesi ve Maliyet Analizi

Bayram Ateş¹

¹ Dr., Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü
Orcid: 0000-0002-1251-7053

1. Giriş

Yer kabuğunun çeşitli katmanlarında meydana gelen ani enerji boşalmaları, yerkabuğunu oluşturan levhaların hareketine yol açmakta ve bu olay genel olarak deprem şeklinde tanımlanmaktadır. Türkiye gibi aktif bir deprem kuşağında yer alan ülkelerde, yapıların mühendislik hizmetlerinden yoksun inşa edilmesi, geçmişte yaşanan acı deneyimlerin de gösterdiği üzere, depremlerin yıkıcı etkisini önemli ölçüde artırmakta ve deprem kaynaklı riskleri büyötmektedir. Türkiye’de 20. yüzyılın başlarından itibaren meydana gelen doğal afetler neticesinde yaklaşık 87.000 kişi yaşamını yitirmiş, 210.000’den fazla kişi yaralanmış ve 651.000’e yakın konut ya tamamen yıkılmış ya da ağır hasar almıştır (bkz. Şekil 1). Bu doğal afetler arasında zarar gören konutların %76’sı deprem kaynaklıdır (Ergünay, 2007). Türkiye, büyük oranda aktif fay hatları üzerinde yer aldığı için tarihsel süreçte çok sayıda yıkıcı depreme maruz kalmış ve günümüzde de bu risk devam etmektedir. Özellikle 1990–1999 yılları arasında meydana gelen 6 büyük deprem ile 2000–2023 döneminde yaşanan 15 önemli sarsıntı, ülke tarihinde derin izler bırakmıştır. Resmî veriler, Türkiye nüfusunun yaklaşık %27’sinin birinci derece, %25’inin ise ikinci derece deprem riski taşıyan bölgelerde yaşadığını ortaya koymaktadır. Depremden etkilenen nüfusun büyük kısmının kent merkezlerinde bulunması, afet yönetimi açısından şehirleri stratejik öneme sahip hale getirmektedir (Ağın Gözükızıl & Zengin Çelik, 2022; İTÜ, 2023).

Şekil 1 Kahramanmaraş (2023) depreminden kaynaklı bölgedeki hasar gören yapılara örnekler (a: Hatay, b: Adıyaman, c: Malatya, d: Kahramanmaraş)

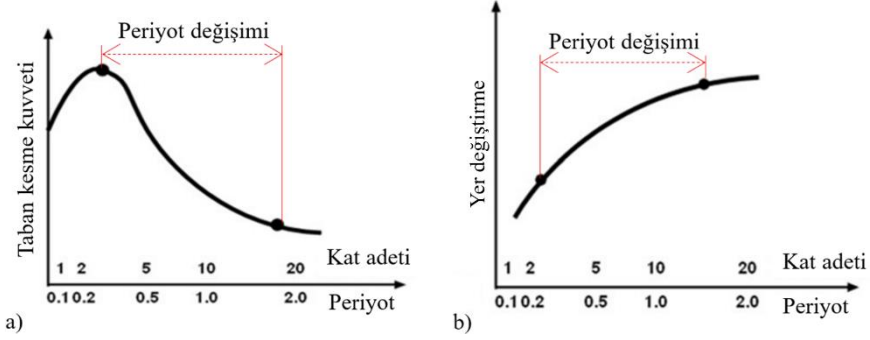


Kaynak: AFAD, 2023

Günümüzde hızlı nüfus artışı ve kentleşme, insanları zorunlu olarak deprem tehlikesi yüksek bölgelerde yaşamaya itmektedir. Bu gerçeklik, özellikle aktif fay hatları üzerinde bulunan ülkelerde, geçmiş depremlerde çok sayıda can ve mal kaybının yaşanmasına neden olmuştur. Depremlerin yol açtığı bu yıkıcı etkiler, yapı güvenliğini artırmaya yönelik mühendislik çözümlerinin geliştirilmesini zorunlu kılmıştır. Başlangıçta, yapıların deprem etkisi altında tamamen elastik davranmasını öngören tasarım yaklaşımları tercih edilmiş, ancak bu yöntemler büyük kesitli eleman gereksinimi nedeniyle yüksek inşaat maliyetleri doğurmuştur. Alternatif olarak geliştirilen sünek davranışa dayalı elastik olmayan tasarımlar ise daha ekonomik çözümler sunmasına rağmen, şiddetli depremler sonrası taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan elemanlarda ciddi hasarlar meydana gelmiştir. Bu durum, deprem güvenliği ile ekonomik sürdürülebilirlik arasındaki dengenin sağlanması gerekliliğini açıkça ortaya koymuştur. Bu bağlamda, yapıların deprem enerjisinden doğrudan etkilenmesini engelleyen bir sistem olan sismik izolasyon kavramı geliştirilmiş ve 20. yüzyılın ikinci yarısından itibaren yapı mühendisliği uygulamalarında giderek daha fazla yer bulmaya başlamıştır. Sismik izolasyon, yalnızca yapısal hasarı azaltmakla kalmayıp, aynı zamanda işlevselliğin korunmasına da katkı sağlayan önemli bir mühendislik yaklaşımı olarak değerlendirilmektedir.

Sismik izolasyon, yapıların deprem esnasında maruz kalabileceği hasarları en aza indirmeyi hedefleyen bir mühendislik yaklaşımıdır. Temel prensibi, yer hareketlerini yapıya doğrudan iletme yerine, bu hareketlerin etkisini yapıdan izole etmektir. Bu amaçla, yapı ile zemin arasına yerleştirilen esnek veya kayıcı özellikteki özel sistemler kullanılarak, yapının yatay hareketleri ile zeminin yatay hareketleri birbirinden ayrılır. Böylece yapının hem kendisinde hem de iç mekân bileşenlerinde oluşabilecek deprem kaynaklı hasarlar önemli ölçüde azaltılabilir (Taylor & Igusa, 2004). Bu tür sistemler genellikle yapının temel seviyesinde uygulandığından, “taban izolasyonu” terimi de yaygın biçimde kullanılmaktadır. Sismik izolasyonun temel amacı; yapının dinamik özelliklerini değiştirmektir. Özellikle yapı rijitliğini azaltarak doğal titreşim periyodunu uzatmak ve aynı zamanda yapının sönüm oranını artırmak suretiyle, depremin yapıya iletildiği ivme ve kuvvetleri azaltmak hedeflenir (bkz. Şekil 2). Bu yaklaşım, deprem enerjisinin yapıya zarar vermeden sönümlenmesini sağlayan etkili bir yöntem olarak günümüzde pek çok yapı türünde uygulanmaktadır.

Şekil 2 Ankastre mesnetli yapıda a) taban kesme kuvveti periyot ilişkisi b) yer değiştirme-periyot ilişkisi



Kaynak: Naeim, 2001

1.2. Geleneksel Sismik İzolasyon Sistemleri

Sismik izolasyon, son yıllarda depreme karşı dayanıklı yapı tasarımı kapsamında önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir. Bu kapsamda, günümüzde yapı mühendisliğinde kabul gören başlıca izolasyon yöntemleri üç ana grupta toplanmaktadır: aktif kontrol sistemleri, pasif kontrol sistemleri ve her iki yöntemi birleştiren hibrit kontrol sistemleri. Bu sistemler, yapıların deprem yükleri altındaki performanslarını iyileştirmeyi ve olası yapısal hasarları asgari düzeye indirmeyi amaçlamaktadır.

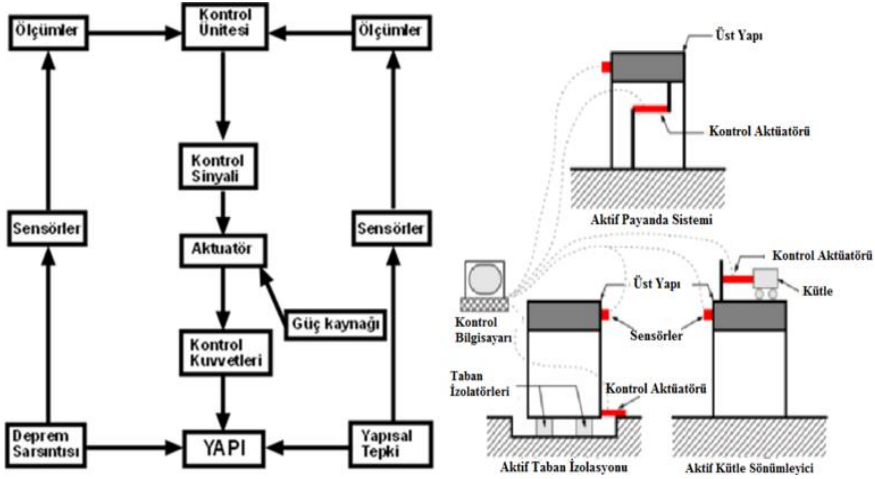
1.2.1. Aktif Kontrol Sistemleri

Dinamik etkilerin (örneğin; trafik, rüzgâr ve deprem gibi doğal ya da yapay kaynaklı yüklerin) yapılar üzerindeki olumsuz sonuçlarını azaltmak amacıyla geliştirilen ve özel donanımlar aracılığıyla kontrol kuvveti üreten sistemler, "aktif kontrol sistemleri" olarak adlandırılmaktadır (Jiang, 1998). Bu sistemler temel olarak üç ana bileşenden oluşur: sensörler, aktüatörler ve kontrol ünitesi. Sensörler genellikle yapının farklı noktalarına yerleştirilerek titreşim, yer değiştirme veya ivme gibi parametreleri ölçen LVDT'ler, yük hücreleri ve ivmeölçerleri kapsar. Aktüatörler ise kontrol ünitesinden gelen sinyallere bağlı olarak çalışan ve titreşimleri sönmüleyecek karşı kuvvetleri üretmek üzere harici enerji kaynaklarına bağlanan elektrohidrolik düzeneklerdir. Sistemin beyni olarak nitelendirilebilecek kontrol ünitesi, sensörlerden elde edilen verileri işleyerek belirli bir kontrol algoritması çerçevesinde analiz eder ve gerekli karşı tepkiyi oluşturmak için aktüatörlere komut sinyalleri gönderir. Bu sistemin çalışma mantığına dair genel bir şema Şekil 3a'da sunulmaktadır.

Aktif kontrol sistemlerinin öne çıkan avantajları arasında; kullanılan donanımın kapasitesine bağlı olarak geniş bir kontrol aralığına sahip olmaları, farklı zemin koşulları ve yer hareketleri altında uygulanabilir olmaları, kontrol hedeflerinin (örneğin; yapı güvenliği ya da kullanıcı konforu) doğrultusunda özelleştirilebilir

olmaları ve çeşitli kaynaklardan kaynaklanan titreşimlere karşı etkinlik gösterebilmeleri yer almaktadır. Bununla birlikte, bu sistemlerin bazı önemli sınırlılıkları da mevcuttur. Özellikle sinyal işleme sürecinin karmaşık yapısı, gerekli kontrol kuvvetlerinin üretilmesi için büyük ölçekli ekipman gereksinimi ve elektrik kesintileri ya da sistem arızaları durumunda sistemin işlevini kaybetme riski bu sınırlamalar arasında öne çıkmaktadır (Chang, 2011). Aktif kontrol sistemlerine dair en yaygın uygulamalar; aktif taban izolasyon sistemleri, aktif destek elemanları (bracing) ve aktif kütle sönümleyiciler olarak sıralanabilir. Bu sistemlerin genel işleyişine dair örnek bir gösterim Şekil 3b’de sunulmaktadır.

Şekil 3 Aktif yapısal kontrol sisteminin çalışma diyagramı ve Aktif kontrol sistemlerine örnekler

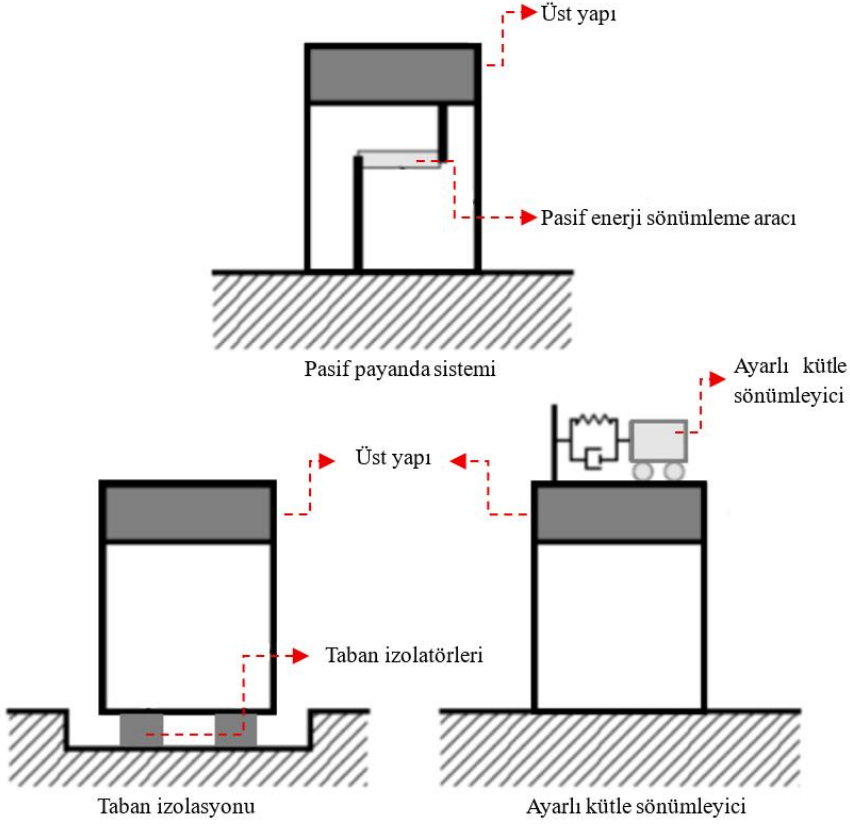


Kaynak: Jiang, 1998; Chang 2011

1.2.2.Pasif Kontrol Sistemleri

Pasif kontrol sistemleri, yapıların belirli bölgelerinde histeretik davranışın korunmasını sağlayarak, taşıyıcı sistemin elastik olmayan enerji taleplerini azaltmayı amaçlamaktadır. Bu sistemlerin temel amacı, deprem gibi dinamik etkiler karşısında yapının enerji tüketimini kontrol altına almak ve yapısal hasarı minimize etmektir. Pasif kontrol sistemleri genel olarak üç ana başlık altında sınıflandırılmaktadır: sönümleyici destek elemanları (bracing), taban izolasyon sistemleri ve ayarlanabilir kütle sönümleyicileri. Bu sistemlerin şematik gösterimine Şekil 4’te yer verilmektedir.

Şekil 4 Pasif kontrol uygulama örnekleri

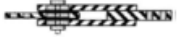
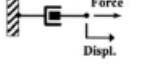
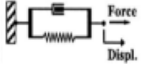
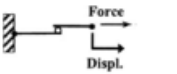
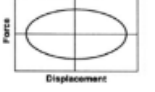
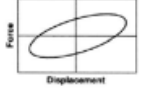
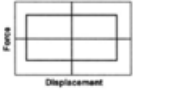


Kaynak: Christenson, 2001

1.2.2.1. Pasif Destek İzolatörler

Pasif destek izolatörleri, çevrimsel yüklemeler sırasında metalik sönümleyicilerin akma davranışı sergileyerek enerji sönümlemesi gerçekleştirmesi esasına dayalı olarak çalışmaktadır. Bu mekanizma, yapıya etkiyen kesme kuvvetini, yapıdaki ivmelenmeyi ve katlar arasındaki göreceli dönme hareketlerini azaltmada etkili olmaktadır. Tablo 1’de yaygın olarak kullanılan pasif sönümleyici türlerinin genel özelliklerine ilişkin karşılaştırmalı bir değerlendirme sunulmuştur (Kuvat, 2019).

Tablo 1 Pasif sönümleme sistemlerinin genel bir özeti

	Viskoz Akışkan Sönümleyici	Viskoelastik Katı Sönümleyiciler	Sürtünme Sönümleyiciler	Metalik Sönümleyiciler
Temel Yapıları				
İdealize Edilmiş Fiziksel Modelleri			İdealize Modeli Mevcut değil	
İdealize Edilmiş Histeretik Davranışı				
Olumlu yanları	Düşük deplasmanlarda aktif olur. Doğrusal olanların modellenmesi basittir. Özellikleri frekans ve sıcaklığa bağlı değildir. Askeri uygulamalarda performansı kanıtlanmıştır.	Düşük deplasmanlarda aktif olur. Merkezlenme kuvvetleri oluşturur. Doğrusal davrandığı için modellemesi nispeten kolaydır.	Stabil bir histeretik davranışa sahiptir. Kullanım ömrü uzundur. Ortam sıcaklığından bağımsızdır. Malzeme ve davranışı Uygulayıcılara aşinadır.	Her bir çevriminde büyük miktarda enerji sönümler. Ortam sıcaklığından bağımsızdır.
Olumsuz yanları	Sönümleyici içerisindeki viskoz sıvının sızıntı yapma riski mevcuttur.	Deformasyon kapasiteleri sınırlıdır. Özellikleri sıcaklık ve frekansa bağlıdır. Malzemelerin ayrışma ve yırtılma ihtimali mevcuttur.	Büyük depremlerden sonra yenilenmeleri gerekir. Doğrusal davranmadıkları için doğrusal olmayan yöntemlerle analiz edilmesi gerekir.	Kayma ara yüzeyleri zamanla değişebilir. İleri derecede doğrusal olmayan davranışa sahiptir. Merkezlenme kuvvetlerinin oluşmaması durumunda kalıcı deplasmanlar meydana gelebilir.

Kaynak: Symans vd., 2008

Bu tür izolatörlerin etkinliği, kullanılan metal malzemenin gerilme-deformasyon karakteristikleri ile izolatörün geometrik özellikleri arasında doğrudan bir ilişki bulunmasına bağlıdır. Pasif destek izolatörlerinin sağladığı başlıca avantajlar ise şunlardır:

- Diğer pasif sistemlere göre daha ekonomik olmaları,
- Çevrimsel yüklemeler altında kararlı bir performans sergilemeleri,
- Düşük genlikli tekrarlı yüklerde üstün yorulma dayanımına sahip olmaları,
- Uzun hizmet ömrü sunmaları,
- Performanslarının çevresel etkenlerden ve sıcaklık değişimlerinden büyük ölçüde bağımsız olması (Constantinou vd., 1998).

Pasif destek izolatörleri, belirli bir dinamik yükleme koşulu göz önünde bulundurularak optimize edildiklerinde yüksek düzeyde sismik izolasyon sağlayabilmektedir. Ancak, yükleme senaryolarındaki değişiklikler durumunda bu etkinlik önemli ölçüde azalabilmektedir (Christenson, 2001). Bu sınırlılık, söz konusu sistemlerin en temel dezavantajlarından biri olarak değerlendirilmektedir.

1.2.2.2.Pasif Taban İzolasyonu

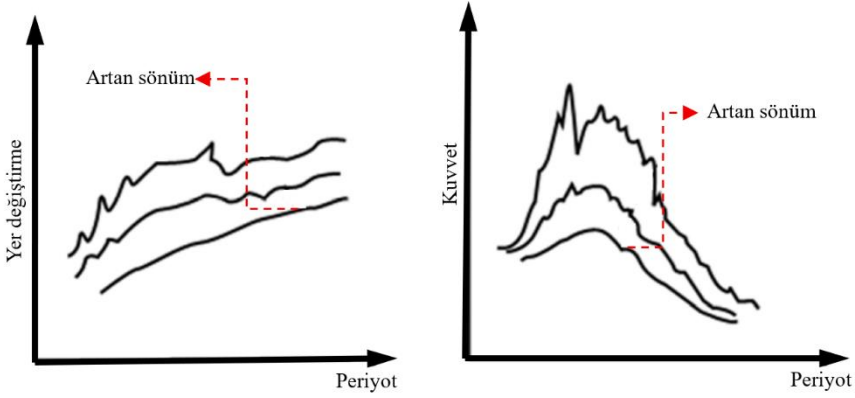
Taban izolasyonu, üst yapının taşıyıcı elemanları ile temel sistemi arasına yerleştirilen esnek ya da kayıcı bir ara yüzey aracılığıyla, yapı ile zemin hareketinin birbirinden ayrılmasını sağlayarak deprem etkilerini azaltmayı hedefleyen bir sismik koruma yöntemidir (Dolce & Cardone, 2003). Pasif kontrol teknikleri içerisinde en yaygın biçimde kullanılan ve etkili sonuçlar sağlayan yaklaşımlardan biridir. Bu sistemin temel bileşenleri izolatörler ve bunlara eşlik eden yardımcı elemanlardır. İzolatörler, düşey yönde yüksek rijitliğe sahipken, yatay yönde daha esnek davranırlar. Yardımcı bileşenler ise yapının yatay hareketlerini sınırlandıran, enerjiyi sönümleyen ve sarsıntı sonrası yapının orijinal konumuna dönmesini destekleyen elemanlar olarak görev yapar. Genel olarak, pasif taban izolasyon sistemleri iki ana gruba ayrılmaktadır: sönümleyici taban izolatörleri ve kayıcı taban izolatörleri.

1.2.2.3.Sönümleyici Tipte Pasif Taban İzolatörleri

Ankastre mesnet koşullarına sahip bir yapıda, kat sayısının artması yapının doğal periyodunu da artırmakta, bu durum ise taban kesme kuvvetinin azalmasına yol açmaktadır. Öte yandan, periyottaki artış, yapıda daha büyük yer değiştirmelerin oluşmasına neden olmaktadır (bkz. Şekil 5). Bu büyüklükteki deplasmanlar, taşıyıcı sistem elemanlarında yapısal hasar riskini artırabilir. Kat kesme kuvvetleri ile yer değiştirmelerin kontrol altına alınabilmesi için kullanılan başlıca yöntemlerden biri de yapının sönüm oranının artırılmasıdır (bkz. Şekil 5). Ancak, yapıların doğal sönüm oranları kesin olarak belirlenemediğinden, ankastre mesnetli yapıların tasarımında genellikle yönetmeliklerde tanımlandığı üzere %5 oranında sönüm varsayımı yapılmaktadır. Bu nedenle, ihtiyaç duyulan ek sönüm, sisteme entegre edilen sönümleyici nitelikteki yapısal elemanlar aracılığıyla sağlanmaktadır. Tüm bu ilişkiler dikkate alınarak, yapının periyodunu artırmak ve buna bağlı olarak ortaya

ıkan büyük yer değiştirmeleri temel seviyesinde karşılamak amacıyla sönümleyici özellikte taban izolatörleri geliştirilmiştir.

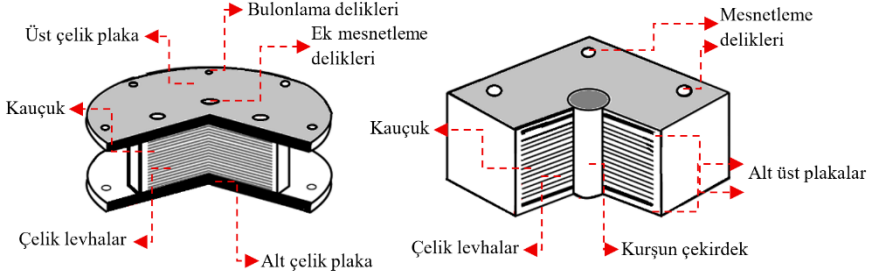
şekil 5 Sönüm oranına bağlı olarak yer değiştirme ve kuvvet spektrumları



Kaynak: Naeim, 2001

Bu tür izolatörler, iki kalın elik plaka arasına yerleştirilen kauçuk ve ince elik levhaların birbirine yapıştırılmasıyla elde edilen ve üretimi görece basit olan kompozit mesnetlerdir. Kauçuk tabakalar üst yapıya yatay yönde gerekli esnekliği kazandırırken, elik levhalar ise düşey yönde yeterli rijitliğin sağlanması katkıda bulunmaktadır. Laminar kauçuk mesnetler ile kurşun çekirdekli laminar kauçuk mesnetler bu grubun en yaygın türleri arasında yer almaktadır (bkz. şekil 5). Yüksek sönüm kapasitesine sahip kauçuk malzemelerin kullanıldığı bu sistemler, ilave bir sönümleyiciye ihtiyaç duyulmadan etkili bir sismik izolasyon sağlayabilmektedir. Ancak, bu sistemler aynı zamanda mesnet içerisinde önemli düzeyde yer değiştirmelere neden olmuştur. Bu sorunu gidermek amacıyla, mesnetin merkezine mekanik bir enerji sönümleyici olarak kurşun çekirdek yerleştirilmiştir. Kurşunun bu uygulamada tercih edilmesinin temel nedenleri; düşük kayma gerilmelerinde akma göstermesi, gerilme-şekil değiştirme davranışının neredeyse ideal bir elastoplastik özellik sergilemesi, zamanla mekanik özelliklerinde bozulma yaşanmaması ve yüksek yorulma dayanımı sunmasıdır (Hamidi, 2006).

Şekil 6 Mesnet kesitleri ve bileşenleri a) laminar kauçuk b) kurşun çekirdekli laminar kauçuk

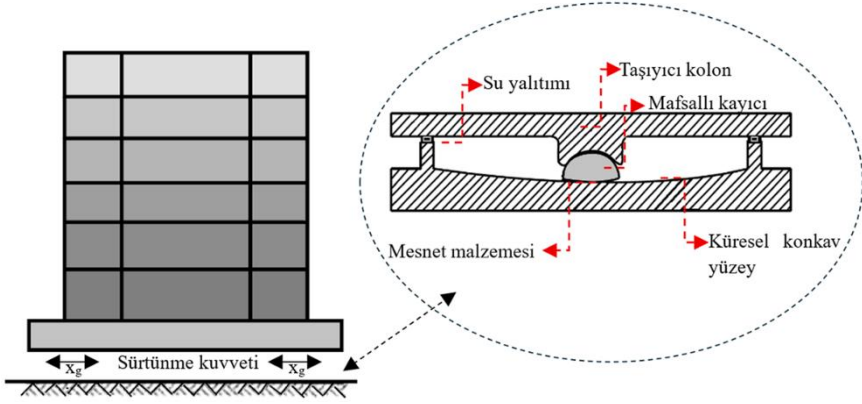


Kaynak: Baştuğ, 2004

1.2.2.3. Kayıcı Tipte Pasif Taban İzolatörleri

Kayıcı taban izolasyonu sistemleri, sismik izolasyon teknolojileri arasında hem en eski hem de en basit uygulamalardan biri olarak kabul edilmektedir. Bu sistemin çalışma mantığı, deprem anında yapı tabanında oluşan sürtünme kuvvetlerinin kontrol altına alınarak, üst yapıya aktarılan yatay kuvvetlerin azaltılması esasına dayanmaktadır. Uygulamada; saf sürtünmeli, sürtünmeli sarkaç tipi ve esnek sürtünmeli olmak üzere farklı alt türleri bulunmaktadır. Özellikle saf sürtünme esasına dayalı sistemler, düşük maliyetli ve kolay uygulanabilir yapıları nedeniyle genellikle gelişmekte olan ülkelerde ekonomik yapıların temel sistemlerinde yaygın biçimde kullanılmakta ve başarılı sonuçlar vermektedir (bkz. Şekil 7). Ancak, kayma yüzeyleri arasında meydana gelebilecek plastik deformasyonlar, özellikle yüksek frekanslı titreşimler sırasında yapının zarar görmesine neden olabilmektedir (Hamidi, 2006). Sürtünmeli sarkaç tipi sistemlerde ise, genellikle yüksek dayanımlı paslanmaz çelik yüzeyler veya son yıllarda yaygınlaşan teflon esaslı küresel kayma yüzeyleri ve kayıcı mafsallar kullanılmaktadır (bkz. Şekil 7).

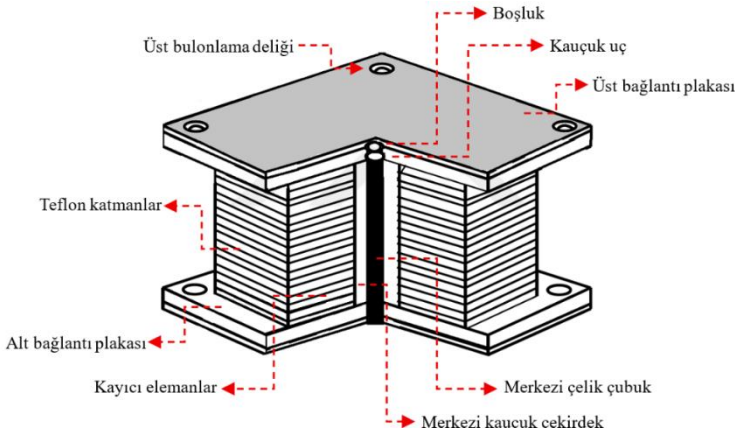
Şekil 7 Saf sürtünmeli sistemin şematik gösterimi ve Sürtünmeli sarkaç izolatorün kesiti



Kaynak: Hamidi, 2006

Deprem enerjisi, çelik veya teflon yüzeyler ile mafsallı kayıcı elemanların dış yüzeyleri arasında oluşan sürtünme kuvvetleri aracılığıyla sönmelenmektedir. Aynı zamanda, kayma yüzeyinin küresel geometrisi sayesinde, sarsıntı sonrasında yapının başlangıç konumuna dönebilmesi için gerekli olan geri çağırma kuvvetleri de bu sistem tarafından doğal olarak üretilmektedir. Bu sistemin en önemli avantajları arasında; yapı periyodunun bina kütesinden bağımsız olarak belirlenebilmesi, sistemdeki esneklik ve sönm oranlarının birbirinden ayrı kontrol edilebilmesi, ayrıca küçük ölçekli depremler ya da rüzgâr etkisi gibi durumlarda sistemin rijitliğini koruyabilmesi yer almaktadır. Öte yandan, esnek sürtünmeli izolatörler Mostaghel (1983) tarafından geliştirilmiş olup, bu tür sönmleyiciler iki kalın çelik levha arasında konumlandırılmış bir kauçuk çekirdek ve çevresel olarak yerleştirilen, birbirine temas eden teflon disklerden oluşmaktadır (bkz. Şekil 8).

Şekil 8 Esnek sürtünmeli izolatorün kesiti



Kaynak: Baştuğ, 2004

Tasarım ivme spektrumuna göre değerlendirildiğinde, yapının periyodunun artması durumunda yapısal ivme tepkisinin önemli ölçüde azaldığı, buna karşılık yatay yer değiştirmelerin belirgin şekilde arttığı gözlemlenmektedir. Pasif taban izolasyon sistemlerinin temel amacı, bu artan yer değiştirmelerin ara yüzey elemanları tarafından absorbe edilmesini sağlamak ve üst yapı üzerindeki deplasman etkilerini sınırlandırmaktır. Bu yaklaşıma dayanan tasarım sürecinde genellikle zemin-yapı etkileşimi göz ardı edilmekte ve izolatörlerin yapı davranışı üzerindeki etkileri sabit mesnetli modellemeler üzerinden değerlendirilmektedir. Ancak çeşitli çalışmalar, zemin-yapı etkileşiminin izolasyonlu yapıların dinamik özellikleri üzerinde kayda değer bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur. Örneğin, Mahmoud vd. (2012) tarafından gerçekleştirilen nümerik analizler, özellikle periyodu uzun olan izolasyonlu yapılar ve yüksek yer ivmesinin gözlemlendiği deprem için zemin-yapı etkileşiminin etkisinin oldukça belirgin olduğunu göstermektedir. Benzer şekilde, Haiyang vd. (2014), zemin-yapı etkileşiminin taban izolasyon sistemlerinin etkinliğini azalttığını ve bu olumsuz etkinin, maksimum yer ivmesi arttıkça daha da belirgin hale geldiğini ifade etmişlerdir. Luco (2014) ise zemin-yapı etkileşiminin, taban izolasyon sistemi ile üst yapı arasında rezonans etkisini güçlendirdiğini raporlamıştır. Öte yandan, pasif taban izolasyon sistemlerinin yaygın kullanımını sınırlayan bazı teknik ve ekonomik zorluklar da mevcuttur. Bu zorluklar arasında; sistemlerin karmaşık mühendislik uygulamaları gerektirmesi, yüksek maliyetleri, çoğunlukla yalnızca özel ve önemli yapılarda uygulanabilmesi ile düşey yönlü titreşimlere karşı yeterince etkili olmamaları sayılabilir (Xiong & Li, 2013).

1.2.3.Yarı Aktif Kontrol Sistemleri

Yarı aktif kontrol sistemleri, pasif izolasyon sistemlerine düşük maliyetli ve düşük kapasiteli bir kontrol mekanizmasının entegre edilmesiyle oluşturulan bir kontrol yaklaşımıdır. Bu sistemlerde, pasif izolatörle donatılmış yapının hareketine bağlı olarak, kontrol birimi ve yardımcı elemanlar aracılığıyla sınırlı büyüklükte kontrol kuvvetleri üretilmektedir. Kontrol ünitesinin çalışması için yalnızca çok az miktarda harici enerji gerekmektedir. Ancak, bu mekanizma yalnızca pasif sistemin yetersiz kaldığı durumlarda aktif hale gelmekte ve bu nedenle kontrol kabiliyeti sınırlı kalmaktadır. Bu kısıtlamalar, daha gelişmiş ve etkili bir çözüm olarak aktif kontrol sistemlerinin geliştirilmesine zemin hazırlamıştır (Kuvat, 2019).

1.2.4.Hibrit Kontrol Sistemleri

Aktif ve pasif kontrol sistemlerinin dezavantajlarının büyük ölçüde ortadan kaldırılarak birlikte kullanıldığı hibrit sistemler, son dönemde geliştirilen yenilikçi kontrol yaklaşımları arasında yer almaktadır. Bu sistemlerin, aktif kontrol sistemleriyle karşılaştırıldığında harici enerji kaynaklarına olan bağımlılıklarının oldukça düşük seviyede olduğu belirtilmektedir (Jiang, 1998). Aktif ve hibrit kontrol

teknolojilerinde kaydedilen ilerlemelere rağmen, halen çözüm bekleyen bazı temel sorunlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Tüm sistemin matematiksel olarak doğru ve kapsamlı bir biçimde modellenmesinin gerekmesi,
- Kontrol altına alınacak yapıların yüksek serbestlik derecesine sahip olması nedeniyle kontrol stratejisinin karmaşık hale gelmesi,
- Yapıdan elde edilecek verilerin güvenilirliğinin sağlanmasında karşılaşılan zorluklar,
- Kullanılan aktüatörlerin yeterli büyüklükte yük üretme kapasitesine sahip olması gerekliliği.

1.3. İzolatörlerin Maliyet Analizi

Sismik taban izolasyonu, yapıları deprem etkilerine karşı korumak amacıyla geliştirilen en etkili yöntemlerden biri olarak kabul edilmektedir. Bu yöntemin uygulanması, yapılara belirli bir ek maliyet yüklemektedir. Ancak, afet sonrasında işlevselliğini sürdürmesi gereken köprüler, hastaneler gibi kritik yapılar ile nükleer santraller ve müzeler gibi özel nitelikli yapılarda bu maliyetin göz ardı edilmesi gerektiği düşünülmelidir. Öte yandan, ticari amaçlarla inşa edilen konut ve ofis yapılarında ise farklı deprem koruma yöntemlerinin maliyetleri ve aralarındaki farklar daha önemli bir değerlendirme kriteri haline gelmektedir.

Sabit tabanlı ve sismik yalıtımlı yapıların maliyet açısından karşılaştırılabilmesi amacıyla, taban oturumu 500 m² olan 29 adet kolona sahip 9 katlı bir konut üzerinden bir maliyet analizi gerçekleştirilmiştir. Her iki yapı türü için yapı yaklaşık maliyetleri ayrı ayrı hesaplanmıştır. Bu hesaplamalarda kullanılan izolatör fiyatları, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından yayımlanan 2025 yılına ait inşaat ve tesisat birim fiyatları esas alınarak Türk Lirası cinsinden belirlenmiştir (bkz. Tablo 2). Yapının yaklaşık maliyeti ise yine Bakanlık tarafından 2025 yılı için yayımlanan “Mimarlık ve Mühendislik Hizmet Bedellerinin Hesabında Kullanılacak Yapı Yaklaşık Birim Maliyetleri Tebliği’ne göre hesaplanmıştır (bkz. Tablo 3).

Tablo 2 İnşaat ve tesisat birim fiyatları

Poz No	Analizin Adı				Ölçü Birimi
15.570.1012	Esdeğer eğrilik yarıçapı 6001-8000 mm arasında, Maksimum düşey yük taşıma kapasitesi 5001-7500 kN arasında, Yatay deplasman kapasitesi $\pm 601-700$ mm olan çift sürtünme yüzeyli deprem yalıtım biriminin temini ve yerine konulması				Adet
Poz No	Tanımı	Ölçü Birimi	Miktarı	Birim Fiyatı	Tutarı (TL)
	Malzeme:				
10.490.1218	Yatay deplasman Kapasitesi $\pm 601-700$ mm olan	Adet	1	222.000,00	222.000,00
10.300.2073	Cimento Esaslı Döküm Harcı (Grout) (TS EN 1504-3)	Kg	100	9,75	975,00
	Makina ve Ekipman:				
19.100.1121	Grout karma ve harç enjeksiyon pompa makinesinin 1 saatlik ücreti	Sa	1	342,45	342,45
19.100.1113	Mobil vinç	Sa	0,5	1.079,77	539,89
	İşçilik:				
10.100.1060	Formen	Sa	2	360,00	720,00
10.100.1061	Topoğraf	Sa	0,5	275,00	137,50
10.100.1068	Birinci sınıf usta	Sa	2	250,00	500,00
10.100.1069	Birinci sınıf usta yardımcısı	Sa	2	185,00	370,00
Malzeme + İşçilik Tutarı					225.584,84
25 % Yükleme kârı ve genel giderler					56.396,21
1 Adet Fiyatı					281.981,05

Kaynak: ÇŞB, 2025a

Tablo 3 Yaklaşık Birim Maliyetleri

III. SINIF (C) GRUBU YAPILAR.....	19.150,00 TL/m²
1. Ağız ve dış sağlığı merkezleri	
2. Emniyet ve jandarma karakol binaları	
3. Halk eğitim merkezleri	
4. Huzurevi, rehabilitasyon ve yaşlı bakım merkezleri	
5. İl tipi otobüs terminalleri	
6. İş merkezleri (yapı yüksekliği 21.50 m'nin altındaki yapılar-üç kat üzeri, yapı yüksekliği 21.50 m dâhil)	
7. Kaplıcalar, şifa evleri, termal tesisler ve benzeri	
8. Konutlar (yapı yüksekliği 21.50 m'den fazla ve 30.50 m'den az olan yapılar- yapı yüksekliği 30.50 m dâhil)	
9. Lise ve dengi okul yapıları	
10. Müstakil ve/veya ikiz konutlar (bağımsız bölüm brüt inşaat alanı 200 m ² 'den fazla ve 500 m ² 'den az olan yapılar-brüt inşaat alanı 200 m ² dâhil)	
11. Öğrenci yurtları	
12. Toplum sağlığı merkezleri	
13. Tren gar/istasyon binaları (brüt inşaat alanı 1.500 m ² 'den az olan yapılar)	
14. Bu gruptakilere benzer yapılar	

Hesaplamaya dahil edilen yapı grubu

Kaynak: ÇŞB, 2025b

Sismik taban yalıtımlı yapı için tercih edilen izolatör, Tablo 2'de de görülebileceği üzere; eşdeğer eğrilik yarıçapı 6001–8000 mm aralığında, maksimum düşey yük taşıma kapasitesi 5001–7500 kN arasında ve yatay deplasman kapasitesi $\pm 601-700$ mm olan çift sürtünme yüzeyli bir deprem yalıtım elemanıdır. İlgili izolatöre ait birim fiyat, idarece onaylanmış uygulama projesi ile teknik şartnameye ve üretici firmanın özel teknik şartnamesine uygun şekilde üretilmiş deprem yalıtım birimlerini kapsamaktadır. Bu kapsamda; uygun ankraj şablonlarının hazırlanması, bu şablonların kolon kalıplarına sabitlenmesi, ankraj çubuklarının hem kot hem de teraziye uygun şekilde, yapısal donatı içerisinde kalacak biçimde yerleştirilmesi ve beton içerisine sabitlenen ankrajların dayanım kontrolünün gerçekleştirilmesi

işlemleri yer almaktadır. Ayrıca, grout harcı uygulaması öncesinde yüzey hazırlığının yapılması, yüzeyin yeterli nem oranına ulaşması için su ile doyurulması, grout kalıplarının yerleştirilmesi ve sızdırmazlığın silikon veya benzeri malzemelerle sağlanması da sürece dâhildir. Deprem yalıtım birimlerinin kot ve terazisine uygun şekilde yerine montajı, ankraj setleri ile sabitlenmesi, grout harcının üretici teknik şartnamesi ile çevresel koşullara uygun olarak homojen ve topaksız biçimde hazırlanması ve uygun ekipmanlar kullanılarak hava boşluğu bırakılmaksızın uygulanması sağlanmaktadır. Bu işlemlerin ardından, deprem yalıtım biriminin üzerine gelecek döşeme tabliyesi betonu döküldükten sonra kilit cıvatalarının sökülmesi gerekmektedir. Tüm bu işlemler; şantiye sahasında gerçekleştirilecek her türlü yükleme, boşaltma, yatay ve düşey taşıma işleri ile birlikte, montaj sırasında kullanılacak her türlü malzeme, zayiat, işçilik, makine, ekipman giderleri ve yüklenici karı ile genel giderleri içerecek şekilde değerlendirilmiştir (ÇŞB, 2025a). Söz konusu binanın toplam yapı alanının da 4.500 m² olduğu göz önünde bulundurulduğunda, Tablo 4’te sabit tabanlı bina ve sismik taban yalıtımlı bina için hazırlanan keşif özeti elde edilmiştir.

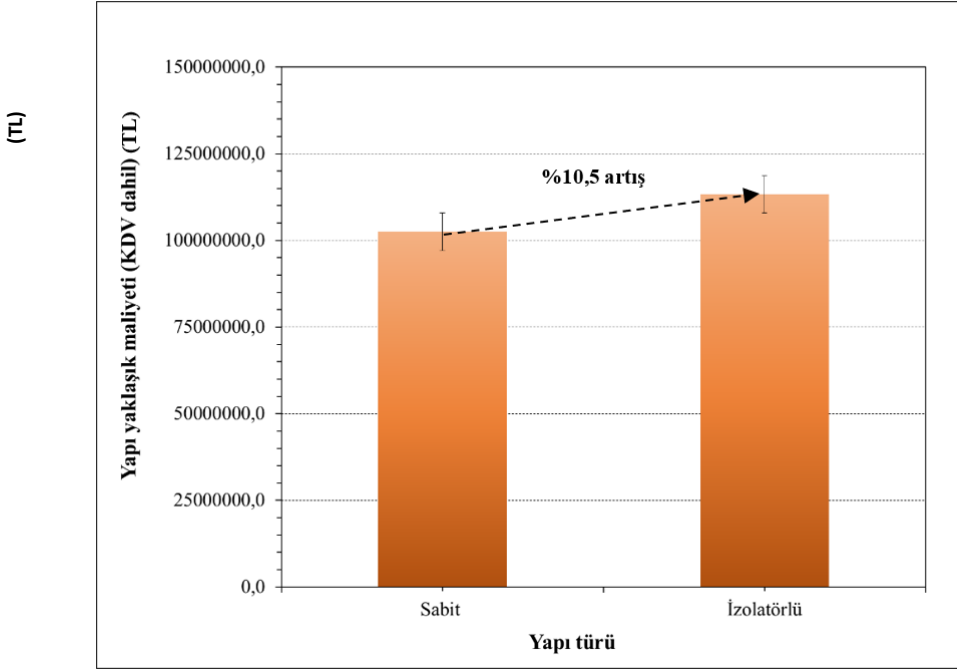
Tablo 4 Sabit tabanlı ve izolatörlü binalar için keşif özeti

	Sabit tabanlı bina (TL)	İzolatörlü bina (TL)
İnşaat maliyeti (inşaat, elektrik ve makine tesisatları dahil olmak üzere)	4.500 m ² *19.159,00 TL/m ² =86.215.500,00	4.500 m ² *19.159,00 TL/m ² =86.215.500,00
Sismik izolatör maliyeti	-	29 adet*281.981,05 TL/adet=8.177.450,45
KDV(20%)	17.243.100,00	18.878.590,09
Genel toplam	102.458.600,00	113.271.540,50

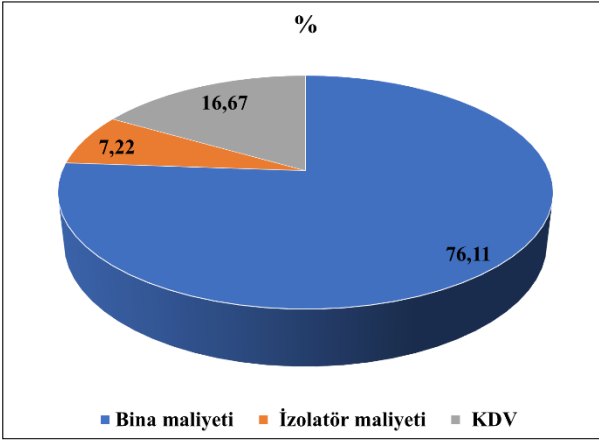
Yapılan hesaplamalar neticesinde, sismik taban yalıtımlı yapının toplam inşaat maliyetinin, sabit tabanlı yapıya kıyasla yaklaşık %10,50 oranında daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu fark, büyük ölçüde sismik izolasyon sisteminin uygulanmasından kaynaklanan ek maliyetlerden oluşmaktadır. Bu sonuç, sismik

izolasyonun ilk yatırım maliyetinde artışa yol açtığını ancak yapı güvenliği açısından önemli avantajlar sunduğunu göstermektedir. Sismik izolasyon sisteminde kullanılan izolatörlerin maliyeti de ayrı olarak değerlendirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre, izolatörlerin maliyeti toplam yapı maliyetinin yaklaşık %7,20'sini oluşturmaktadır. Bu oran, izolasyon sisteminin toplam maliyet içindeki etkisinin sınırlı, ancak belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır. İzolatörler, sismik performansı artırırken yapının hasar alma riskini azaltmakta ve kullanım sonrası sürekliliğini sağlamaktadır. Sismik izolasyon sisteminin toplam yapı maliyetine getirdiği ilave yük ve izolatörlerin toplam maliyet içerisindeki oranı, Şekil 9 ve Şekil 10'da grafiksel olarak sunulmaktadır. Bu grafikler hem kullanıcı hem de yatırımcı açısından sistemin maliyet/fayda dengesinin değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. Görsel analizler, sabit tabanlı yapılar ile sismik yalıtımlı yapılar arasındaki farkları açık bir biçimde ortaya koymaktadır.

Şekil 9 İzolatörlü binalarda maliyet artışı



Şekil 10 Sismik yalıtım maliyetinin yapı yaklaşık maliyeti içindeki payı



Kaynakça

- Ağın Gözükızıl, C. & Zengin Çelik, H. (2022). Kentsel Afetlerle Mücadelede 6306 Sayılı Kanun Kapsamındaki Kentsel Dönüşüm Uygulamalarının Türkiye Afet Durumu Üzerinden Okunması. Kent Akademisi Dergisi, 15(3):1109-1131.
- Baştuğ, B. K., (2004). Yapı Sistemlerinde Depreme Karşı Sismik İzolatör Kullanılması, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Chang, C. M. (2011). Multi Axial Active Isolation for Seismic Protection of Buildings, Phd Thesis, Graduate College, University of Illinois at Urbana, Illinois, USA.
- Christenson, R., E. (2001). Semiactive Control of Civil Structures for Natural Hazard Mitigation: Analytical and Experimental Studies, Phd Thesis, Graduate School, University of Notre Dame, Indiana, USA.
- Constantinou, M., C., Soong, T., T. & Dargush, G., F., (1998). Passive Energy Dissipation Systems for Structural Design and Retrofit, Monograph No.1, Multidisciplinary Center for Earthquake Research, Buffalo, NY.
- Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (ÇŞB), (2025a). İnşaat birim fiyat analizleri, 1. Cilt, Yüksek Fen Kurulu Başkanlığı
- Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (ÇŞB), (2025b). Mimarlık ve Mühendislik Hizmet Bedellerinin Hesabında Kullanılacak Yapı Yaklaşık Birim Maliyetleri Tebliği, Resmi gazete.
- Dolce M. & Cardone D. (2003). Seismic protection of light secondary systems through different base isolation systems, Journal of Earthquake Engineering, 7, 2, 223-251.
- Ergünay, O. (2007). Türkiye'nin Afet Profili, TMMOB Afet Sempozyumu Bildiriler Kitabı. Ankara, Mattek Matbaacılık.

- Haiyang, Z., Xu Y., Chao Z. & Dandan J. (2014). Shaking table test for the seismic response of a base-isolated structure with the SSI effect, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 67, 208-218.
- Hamidi, M. 2006. Sliding concave foundation (SCF) isolation system, Doctoral thesis, School of Graduate and Postdoctoral Studies, The University of Western Ontario, London, Ontario, Canada.
- İstanbul Teknik Üniversitesi, (İTÜ). (2023). 06 Şubat 2023 04.17 Mw 7,8 Kahramanmaraş (Pazarcık, Türkoğlu), Hatay (Kırıkhan) ve 13.24 Mw 7.7 Kahramanmaraş (Elbistan/Nurhak-Çardak) Depremleri Nihai Rapor. <https://haberler.itu.edu.tr/haberdetay/2023/03/24/itu-den-2023nihai-deprem-raporu> (Erişim tarihi: 01 Ağustos 2023).
- Jiang, H. (1998). Hybrid Damper-Actuator System with Optimum Observer-Controller for Seismic Resistant Structures, PhD Thesis, Faculty of the Graduate School, University of Missouri-Rolla, Missouri, USA.
- Kuvat, A. (2019). Bitümlü Sönümleyici Geomateryallerin tasarlanması ve Sismik İzolasyon Amaçlı Kullanılabilirliklerinin Sayısal olarak İncelenmesi, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- Luco, J. E. (2014). Effect of soil-structure interaction on seismic base isolation, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 66, 167-177.
- Mahmoud, S., Austrell, P., E. ve Jankowski, R. (2012). Simulation of the response of baseisolated buildings under earthquake excitations considering soil flexibility, *Journal of Earthquake Engineering*, 4, 3, 277-301.
- Mostaghel, N. (1983). Resilient-Friction Base Isolator, Report No. UTEC 84-097, Department of Civil Engineering, University of Utah, Salt Lake City, ABD.
- Naeim, F., (2001). *Seismic Design Handbook*, Kluwer Academic Publishers, Boston, USA.
- Symans M. D., Charney F. A., Whittaker A. S., Constantinou M. C., Kircher C. A., Johnson M. W. & McNamara R. J., (2008). Energy dissipation system for applications: current practice and recent developments, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 134, 1,3-21.
- Taylor, A.W., & Igusa, T. (2004). *Primer on Seismic Isolation*; American Society of Civil Engineers (ASCE): Reston, VA.
- T.C. İç İşleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD). (2023a). 06 Şubat 2023 Pazarcık (Kahramanmaraş) MW 7.7 – Elbistan (Kahramanmaraş) MW 7.6 Depremlerine İlişkin Ön Değerlendirme Raporu. https://deprem.afad.gov.tr/assets/pdf/Kahramanmaras%20%20Depremleri_%200On%20Degerlendirme%20Raporu.pdf (Erişim tarihi: 09 Şubat 2023)

Xiong, W. & Li Y. (2013). Seismic isolation using granulated tire-soil mixtures for less developed regions: experimental validation, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 42, 2187-2193.



Trafik ve Kazalar

Adem Ahıskalı (Adem Aliyev)¹

¹ Kastamonu Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü
Merkez/KASTAMONU, Orcid: 0000-0002-1265-7312

1. Giriş

Günümüzde trafik sistemleri, küreselleşen dünyada ekonomik aktivitelerin ve sosyal hareketliliğin temel unsurları arasında yer almaktadır. Ancak, motorlu taşıtların artan kullanımı ve urbanizasyon süreçleri, trafik kazalarını giderek daha karmaşık bir halk sağlığı sorunu olarak nitelendirmektedir. Bu durumu değerlendirirken, trafik kazalarının yalnızca bireysel değil, aynı zamanda toplumsal maliyetleri de dikkate alınmalıdır. Kazalardan kaynaklanan can kayıpları, yaralanmalar ve psikolojik etkiler sağlık sistemleri üzerinde önemli bir yük oluşturmakta; buna ek olarak, işgücü kaybı ve üretim süreçlerindeki aksaklıklar makroekonomik dengeleri tehdit etmektedir.

Trafik güvenliğinin sağlanması, mühendislik, hukuk ve davranışsal psikoloji disiplinlerinin birleşerek oluşturduğu çok yönlü bir alan olmaktadır. Yol tasarımındaki geometrik standartlar, trafik işaretlerinin görünürlüğü ve sürücü eğitim programlarının kapsayıcılığı, kaza önleme açısından kritik unsurlar olarak belirginleşmektedir. Gelişmekte olan ülkelerde, altyapı yetersizlikleri ve denetim sistemlerindeki eksiklikler, trafik güvenliği politikalarının etkinliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Ayrıca, insan faktörünün (aşırı hız, alkol tüketimi, dikkat dağınıklığı) kaza istatistiklerindeki etkisi, davranışsal müdahale stratejilerinin gerekliliğini açıkça göstermektedir.

Bu çalışma, “Türkiye Ve Azerbaycan Karayolu Güvenlik Sistemlerindeki Gelişmelerin Trafik Kazaları Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi” konu başlıklı Adem ALİYEV’ in (Adem AHISKALI) Doktora tezinden üretilerek trafik ve kazalar ana başlık altında hazırlanmıştır[1]. Trafik kazalarının azaltılması ve düzenli, güvenli bir trafik ortamının oluşturulmasında insan faktörünün kritik rolünü vurgulamakta ve bu faktörün göz ardı edilmemesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, karayollarının güvenlik sistemleri açısından kara noktaların tespitini kolaylaştırmak amacıyla trafik kaza raporlarına eklemeler ve yeni formül önerileri sunulmuştur.[1]

2. Trafik ve Kazaların Tanımı

Trafik: Ulaşım ve seyahat amacıyla, yayaların ve yolcuların kullanımına yönelik genel bir terimdir. Trafik olgusu, insan, araç, çevre ve yol gibi unsurlar arasında gerçekleşmektedir[2]. Trafik kazası, 2918 sayılı Karayolları Trafik Kanunu ve GOST 23457-86'ya göre, karayollarında hareket eden bir veya daha fazla aracın dâhil olduğu, ölüm, yaralanma ve maddi hasar ile sonuçlanan bir olaydır[3], [4].

Kazalar: Toplumsal bir yapı içerisinde önceden öngörülmemen, bilinmeyen ya da kontrol dışı gelişen ve çevreye zarar verme potansiyeli taşıyan olaylara kaza denir. Bu kazalar, oluşum sebeplerine göre çeşitli kategorilere ayrılmaktadır.

Kitle kazalar: Depremler, su baskınları, toprak kayması, tayfun, kasırga, kuraklık v.b.

Bireysel kazalar: Trafik kazaları, iş ve ev kazaları, zehirlenmeler, ateşli silahlarla yaralanmalar, meslek hastalıkları v.b [5].

Trafik ve kazalar, yol güvenliği ile halk sağlığını anlamak açısından son derece önemli olan birbiriyle bağlantılı kavramlardır. Trafik, araçların ve yayaların karayollarında hareketini ifade ederken, kazalar, özellikle trafik kazaları, bu yollarda meydana gelen ve genellikle yaralanma, ölüm veya maddi hasara yol açan istenmeyen olaylardır. Bu kazalar, sıklıkları ve sonuçlarının ciddiyeti nedeniyle önemli bir halk sağlığı sorunu teşkil etmektedir. Trafik, insan, araç ve yol bileşenlerinin etkileşimini ifade eden karmaşık bir sistemdir. Bu sistem, ulaşım faaliyetlerinin temelini oluşturmakta ve sosyoekonomik yaşamın sürdürülebilirliği açısından hayati bir rol oynamaktadır.[6], [7]

Trafiğin tanımı, yalnızca fiziksel hareketliliği değil, aynı zamanda trafik kuralları, işaretlemeler ve denetim mekanizmaları gibi düzenleyici unsurları da içermektedir. Trafik kazaları, bu sistemdeki beklenmedik aksaklıklar sonucunda meydana gelen, can kaybı, yaralanma veya maddi hasar ile sonuçlanan olaylardır. Bu kazalar genellikle insan hatası (dikkatsizlik, kural ihlali), araç kaynaklı teknik arızalar veya yol altyapısındaki eksiklikler gibi çeşitli faktörlerin bir araya gelmesiyle ortaya çıkmaktadır[8]. Trafik kazaları, uluslararası literatürde "önlenebilir fakat karmaşık bir halk sağlığı sorunu" olarak tanımlanmaktadır. Bu tür olaylar, yalnızca bireysel sonuçlarla sınırlı kalmayıp, aynı zamanda toplumsal refahı, sağlık sistemlerini ve ekonomik dengeleri de doğrudan etkiler. Örneğin, bir kaza sonrasında meydana gelen acil müdahale masrafları, üretim kayıpları ve adli süreçler, sistematik bir zincirleme etki oluşturur. Bu nedenle, trafik kazalarının analizi, mühendislik, hukuk, psikoloji ve şehir planlama gibi disiplinlerin kesişimi ile multidisipliner bir yaklaşım gerektirmektedir.

3. Trafik Kazalarının Nedenleri

Türkiye ve Azerbaycan'da meydana gelen trafik kazaları, her yıl hem maddi hem de manevi açıdan kayıplara neden olarak ciddi sorunlar ortaya çıkarmaktadır. İstatistikler, bu konuda endişe verici eğilimleri gözler önüne sererken, Türkiye, dünya genelinde trafik kazası ölümleri bakımından ilk on ülke arasında yer almaktadır[9]. Bu durum, politika yapıcıların ve toplumun genelinin acil bir şekilde dikkatini çekmesi gereken bir meseledir.

Trafik kazalarında etkili olan faktörleri 4 ana grupta toplamak mümkündür. Bunlar;

1. Yolu kullananlar (sürücü, yaya...)
2. Yol ve yolun çevresi
3. Araç faktörü
4. Denetim ve hukuksal faktörler

Kazadan önceki fiziksel durum, yorgunluk, hastalık, alkol tüketimi ve ilaç kullanımı gibi faktörler, kazanın meydana gelmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Psikolojik durum, üzüntü ve keder, bireyin ruhsal sağlığını olumsuz etkileyen önemli duygusal durumlar arasında yer almaktadır. Kişisel problemler, bireyin yaşam kalitesini düşüren ve psikolojik dengesini bozan unsurlar olarak öne çıkmaktadır. Zihinsel dağınıklık ve dikkatsizlik, bireyin düşünce süreçlerini olumsuz yönde etkileyerek, günlük yaşamda verimliliği azaltabilir. Ayrıca, taşıt kullanmaya aşırı istek duymak, bireyin güvenliğini tehdit eden bir davranış biçimi olarak değerlendirilebilir. Sosyal ve kültürel koşullar, cinsiyet, meslek ve eğitim durumu gibi faktörler, bireylerin yaşam deneyimlerini ve toplumsal etkileşimlerini önemli ölçüde şekillendirmektedir. Sürücü olarak edinilen deneyim ve beceriler, yapılan toplam kilometre ile doğrudan ilişkilidir. Taşıt kullanma yeteneği, bireyin araçla olan etkileşimini ve bu süreçte kazandığı alışkanlıkları kapsamaktadır. Ayrıca, sürücünün taşıta olan alışkanlığı ve yola olan adaptasyonu, güvenli ve etkili bir sürüş deneyimi için kritik öneme sahiptir[10]. Bu kadar faktörden sonra trafik kurallarına uyulması gerektiği ancak bu kurallara uyarken yapılan hataları ayrıca incelemek gerek bunlar;

- Sürücüye ait trafik kuralı ihlalleri
- Yayaya ait trafik kuralları ihlalleri

Sürücüye ait kurallar içerisinde ihlallerin olduğu konular tablo 3.1 de verilmiştir.

Tablo 3.1 Sürücüye ait trafik ihlalleri

Kırmızı Işıktaki Geçmek	Taşıt Giremez İşaretini İhlal Etmek	Karşı Şeride Geçmek, Arkadan Çarpmak
Geçim Alanını İhlal Etmek	Yön Değiştirme Manevralarını Hatalı Yapmak	Yanlış Şerit Değiştirmek
İlk Geçiş Hakkını Vermemek	Hatalı Dönüş Yapmak	Hatalı Duraklamak Ve Park Etmek
Park Halindeki Bir Araca Çarpmak	Aşırı Hız Yapmak	Dur İşaretine Uymamak
Hatalı Yük Ve Yolcu İndirmek	Trafığa Uygun Olmayan Bir Araç Kullanmak	Alkollü Araç Kullanmak
Selektör Kaidesinin İhlali		

Yayalara ait kurallar içerisinde ihlallerin olduğu konular tablo 3.2 de verilmiştir.

Tablo 3.2 Yayalara ait kuralları ihlalleri

Kırmızı Işıktaki Geçmek	Araçları ilk geçme hakkı vermemek	Yola birden bire çıkmak
Duran taşıtın önünden ve arkasından çıkmak	Yol ortasında yürümek, oturmak, oynamak	Hareket halindeki araca asılmak, binmek
Yayanın sarhoş olması		

Bunların yanı sıra hem sürücü hem de yayalar için kuralların tamamına uymaları oluşması muhtemel bir olumsuzlukları minimaliz ölçülere indirmektedir. Sürücünün ve yayaların koruma elemanlarının kullanılmamasından kaynaklı kazalarında olduğu görülmektedir[10].

Koruma elemanlarının kullanılmamasında kaynaklı ihlaller en basit şekli ile şöyle sıralayabiliriz. Bunlar;

- Emniyet kemeri kullanmama ihlali
- Koruma başlığı kullanmama ihlali

Yol ve yolun çevresinden kaynaklanan nedenler yolun trafik kazaları üzerindeki etkisi, Türkiye ve Azerbaycan'ın resmi istatistiklerinde de gösterildiği üzere, göz ardı edilemeyecek kadar önemlidir[2], [10]. Bu nedenler tablo 3.3 te verilmiştir.

Tablo 3.3 Yol ve yol çevresi, dinamik unsurlar

Yol ve çevresi kaynaklı nedenler	Dinamik unsurlar
• Yol çökmesi • Yol yapım hatası • Düşük banket • Yol sathı hataları • Yol üzeri boşluklar • Kasis ve ondüle • Yol işaret eksikleri • Görüş engeli yaratan engeller • Doğa kaynaklı engellemeler (sel, buzlama, sis, kar, yağmur....)	• Trafik hacmi • Trafik kompozisyonu • Azami ve asgari hız sınırları

Araçla ilgili unsurlar arasında kusurlu fren, kusurlu rot, kusurlu tekerlek, lastik patlaması ve ışık kusurları gibi faktörler bulunmaktadır. Ayrıca, şanzıman ve vites arızası ile kusurlu direksiyon gibi diğer unsurlar da dikkate alınmalıdır.

Taşıma, denetim, hukuk ve sigorta sistemine dair unsurlar, yolcu ve yük taşımacılığına ilişkin işletme şartlarını, denetim etkinliğini ve hukuki ile sigorta düzenlemelerini kapsamaktadır[10].

4. Kaza Oranının Yüzde Olarak Azaltan Önlemler

Türkiye ve Azerbaycan'daki şehir içi ve şehir dışı yollar, yeni yapılmış, iyi donanımlı ve bakımlı ana caddelerden, yıllar içinde yeterli bakım görmemiş olan eski ve dar tali sokaklara kadar geniş bir yelpazeye sahiptir. Bu çerçevede, kaza oranlarını azaltmaya yönelik tedbirlerin alınmasının zaruri olduğu sonucuna varılmaktadır. Kaza oranlarının yüzdesel olarak azaltan önlemleri tablo 4.1 de verilmiştir.

Tablo 4.1 Kaza oranlarının yüzdesel olarak azaltan önlemler

<u>Önlem türü</u>	<u>Etki % 'si</u>	<u>Kaza türü</u>
Yeni güzergahta yolun kısa bölümlerde yeniden düzenlenmesi	45	Yaralanmalı kazalar
iki yönlü yolların yerine refijilü yolların sağlanması	30	Yaralanmalı kazalar
Küçük kentlerde direkt geçirin tersini	25	Yaralanmalı kazalar
Virajlarda güzergah düzeltmek	80	Yaralanmalı kazalar
Sinyalsiz göbekli kavşakların Düzenlenmesi	50	Yaralanmalı kazalar
Kesişen yolların kademeli hale getirilmesi	60	Yaralanmalı kazalar
“DUR” işaretinin konması	80	Araçlardan meydana gelen Yaralanmalı kazalar
“YAVAŞLAMA” işaretin konması	75	Yaralanmalı kazalar
Otomatik trafik sinyalleri	40	Yaralanmalı kazalar
Trafik sinyalli dört yönlü kavşağa yayalar için “TÜM KIRMIZI” fazının ilavesi	40	Yaralanmalı kazalar
Kaygan kaplamaların düzeltilmesi	80 45	Nemli yollardaki tüm kazalar(Yaralanmalı ve hasarlı) tüm kazalar

Tablo 4.1 Devamı

Tramvay raylarının kaldırılması	10	Yaralanmalı kazalar
Cadde düzenlenmesi ışıklarının	30	Gece meydana gelen yaralanmalı kazalar
Yaya geçitlerinin boyanması	7	Yaya faciaları
Yerleşim bölgelerinde hız limitinin getirilmesi	24	Yerleşim bölgelerinde Yaralanmalı kazalar
Daha önceleri hız sınırı olmayan yollara hız limitinin getirilmesi	19 28	Yaralanmalı kazalar Ölümlü ve ağır yaralanmalı kazalar
“BEKLEME YASAGI” nin getirilmesi	30’ a kadar	Yaralanmalı kazalar
Tek yönlü sistemler	30	İlgili tüm yollardaki yaralanmalı kazalar
Virajlarda görüşün düzenlenmesi	Değişik	Yaralanmalı kazalar
Kavşaklarda görüşün düzenlenmesi	30	Yaralanmalı kazalar

Trafik kazalarının sayısının azaltılması, çok sayıda boyutun göz önünde bulundurulmasını gerektiren karmaşık bir süreçtir. Araştırmalar, hız limitlerinin düzenlenmesi ve radar ile mobil kontrol noktaları gibi elektronik denetim sistemlerinin yaygınlaştırılmasının kaza oranlarını yaklaşık %20-25 oranında azaltabileceğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, alkollü araç kullanımı için uygulanan sıkı cezalar ve kamu bilincini artırmaya yönelik kampanyalar, ölümlü kazalarda %15-20 arasında bir azalma sağlanmasına katkıda bulunmaktadır.

5. Kara Noktalar

Genel olarak "Kara nokta", trafik kazalarının sıkça meydana geldiği alanlar veya noktalar için kullanılan bir terimdir. Bir yol üzerindeki kaza verilerinin istatistiksel analizleri sonucunda, belirli bir kritik değeri aşan kesimler veya noktalar kara nokta olarak tanımlanmaktadır. Bu tanım, trafik güvenliği açısından önemli bir kavramdır ve kazaların yoğunlaştığı yerlerin belirlenmesine yardımcı olur[10]. Kara noktaların tespiti, trafik kazalarının önlenmesi ve güvenliğin artırılması amacıyla kritik bir rol oynamaktadır. İstatistiksel verilerin analizi, bu noktaların belirlenmesinde temel bir yöntemdir[10]. Böylece, kazaların en çok yaşandığı yerler tespit edilerek, bu alanlarda gerekli önlemlerin alınması sağlanabilir. Kara noktalar, trafik kazalarının yoğunlaştığı yerleri ifade eden önemli bir kavramdır. Bu noktaların belirlenmesi, trafik güvenliğinin artırılması ve kazaların azaltılması için gereklidir. İstatistiksel verilerin kullanımı, bu tür analizlerin yapılmasına olanak tanır ve böylece daha güvenli bir ulaşım ortamı oluşturulmasına katkıda bulunur[2], [10].

Karayolları Genel Müdürlüğü, yıllık kaza analizlerinin gerçekleştirilmesi ve trafik güvenliği açısından riskli noktaların belirlenmesi amacıyla Türkiye'de 1994 yılından itibaren yeni bir yöntem uygulamaya koymuştur. Bu yöntem çerçevesinde, yılsonunda Emniyet Genel Müdürlüğü tarafından toplanan kaza verileri, KGM Trafik Şube Müdürlüğü tarafından yapılan istatistiksel değerlendirmelerle birlikte Türkiye genelindeki kritik noktalar tespit edilmektedir[11]. Bu süreç, trafik güvenliğini artırmak ve kazaların önlenmesine yönelik stratejilerin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. Ayrıca, her yılsonunda Karayolları Bölge Müdürlükleri tarafından belirlenen kritik noktalar da dikkate alınarak, her bölge müdürlüğü için iki farklı yöntemle elde edilen bu noktalar bir arada değerlendirilmekte ve o bölgenin kara noktaları belirlenmektedir. Bu yaklaşım, bölgesel trafik güvenliği sorunlarının daha etkili bir şekilde ele alınmasına olanak tanımaktadır. Bu sistematik analizler ve değerlendirmeler, Türkiye'deki trafik güvenliğinin artırılmasına yönelik önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir. Bu çalışma içerisinde, yollar üç gruba ayrılmıştır. Bunlar; otoyollar, devlet yolları ve il yolları.

Bu çalışmada yalnızca devlet yollarında ölçülen Yıllık Ortalama Günlük Trafik (YOGT) verileri kullanıldığından, kara noktalar yalnızca bu yollar için belirlenebilmiştir[1]. Analiz sürecinde, yolların belirli bir sistematik çerçeveye oturtulabilmesi amacıyla üç ana gruba ayrılması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Aynı zamanda, her bir grup içinde 1 km'lik alt kesimler ile kavşak ve köprü gibi noktaların ayrı gruplar halinde ele alınması önerisi yapılmıştır. Ancak, trafik kazası sayımlarındaki verilerin metre bazında yetersizliği, bu önerinin uygulanmasını mümkün kılmamıştır. Bu durum sonucunda, incelemeler yalnızca 1,0 km'lik kesimler üzerinden gerçekleştirilmekte ve bu sınırlı yaklaşım benimsenmiştir.

5.1. Kara noktaların **formüle** edilmiş analiz metotları

Formüle yapılan analiz metotlarında kullanılan kısaltmaların açıklaması aşağıda belirtilmiştir. Formüllerin kısaltmaları şöyledir;

KOP- Kaza oranı (yol kesimi için),

KOJ- Kaza oranı (kavşak için),

KKSP- Kesimdeki kaza sayısı,

KKSJ- Kavşaktaki kaza sayısı,

OGT- Ortalama günlük trafik,
trafik,

TOGT- Toplam ortalama günlük

N- Gün sayısı,

L- Kesim uzunluğu,

KTSP- Kesimdeki toplam kaza sayısı,
sayısını,

KTKSJ- Kavşaktaki toplam kaza

İfade etmektedir.

Kaza sayısı (frekans) metodu

Bu yöntem, ülke genelindeki tüm devlet yollarına ait kaza verilerinin geniş ölçekli haritalar üzerinde gösterilmesi sürecini kapsamaktadır. Söz konusu kaza verileri, yalnızca kaza sayısı ve kaza yerinin belirlenmesi ile sınırlıdır. Bu verilerin haritalar üzerinde işaretlenmesi, kaza eğilimlerinin ve yoğunluklarının görsel olarak analiz edilmesine olanak tanır. Böylece, kaza risklerinin yüksek olduğu bölgeler tespit edilebilir ve gerekli önlemler alınabilir[1].

Kaza oran metodu

$$KOP = \frac{KKSP \times (10^6)}{OGT \times N \times L}$$

$$KOJ = \frac{KKSJ \times (10^6)}{OGT \times N}$$

Sayı oran metodu

$$KOP = \frac{KTSP \times (10^6)}{TOGT \times N \times L}$$

$$KOJ = \frac{KTKSJ \times (10^6)}{TOGT \times N}$$

6. Kaynakça

- [1] Adem Aliyev, “Türkiye ve Azerbaycan kara yolu güvenlik sistemindeki gelişmelerin trafik kazaları üzerindeki etkilerinin incelenmesi”, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Gazi Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Kazaların Çevresel ve Teknik Araştırması Ana Bilim Dalı, 2003. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>
- [2] Muhittin Özdirim, *Trafik Mühendisliği 1*. Ankara: T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü, 1994.
- [3] Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü, *2918 Karayolları Trafik Kanunu*, c. 2918. 1983, s. 687. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=8182&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5>
- [4] Azerbaycan Cumhuriyeti İnşaat Mühendisleri Üniversitesi, “Avtomobil Yollarının Ahtarışı ve Lahiyelendirilmesi”, 1989.
- [5] M.K Çubuk, “Ankara ilinde meydana Gelen Yaya Kazalarının Genel Özellikleri”, program adı: Uluslar arası Trafik ve Yol Güvenliği Kongresi ve Fuarı, 2002.
- [6] M. A. Çeliktürk, U. Talaş, ve B. Çubukçu, “Trafik Güvenliği Dersi İçin Artırılmış Gerçeklik Uygulaması”, *Eskişehir. Türk Dünya. Uygul. Ve Araşt. Merk. Bilişim Derg.*, c. 5, sy 2, ss. 30-36, Ara. 2024, doi: 10.53608/estudambilisim.1565232.
- [7] O. Kavıracı, “Trafik kazaları sonucu gerçekleşen ölümler ve trafik kazalarının önlenmesine yönelik geliştirilen önlemler: AB ülkeleri ve Türkiye”, *Uluslar. Toplum. Bilim. Derg.*, c. 8, sy 1, Art. sy 1.
- [8] H. Demir, S. Adıgüzel, E. Erkal, ve M. Ö. Kavlak, “Trafik Kazalarının Analiz ve Yorumlanmasında Coğrafi Bilgi Sistemlerinin Kullanımı”, *GSI J. Ser. C Adv. Inf. Sci. Technol.*, c. 7, sy 2, Art. sy 2.
- [9] Ghassan Suleiman, Ahmad Dahamsheh, ve Murat Ergun, “Assessment of Fatal Road Traffic Crashes in Turkey”, *Int. Inf. Eng. Technol. Assoc.*, c. 6, sy 10, ss. 733-, Ara. 2020.
- [10] Muhittin Özdirim, *Trafik Mühendisliği 2*. Ankara: T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü, 1994.
- [11] “Emniyet Genel Müdürlüğü Trafik Başkanlığı - İstatistikler”. Erişim: 14 Mayıs 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://trafik.gov.tr/istatistikler37>



Zemin Stabilizasyon Teknikleri ve Güncel Yaklaşımlar

Bayram Ateş¹ & Mehmet Ali Kalaylı²

¹ Dr., Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü
Orcid:0000-0002-1251-7053

² Dr., Kırıkkale Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0003-2776-4740

1. Giriş

Yapıların stabilitesi ve uzun süreli performansı, doğrudan oturduğu doğal zeminlerin veya dolgu malzemesi olarak kullanılan zeminlerin mühendislik nitelikleri ile ilişkilidir. Zeminler, temel sistemleriyle birlikte yapıdan gelen sabit ve hareketli yükler nedeniyle oluşan gerilmeleri güvenli bir şekilde taşıyabilmelidir. Ayrıca çevresel ve iklimsel faktörlerin etkisiyle zemin özelliklerinde meydana gelebilecek değişimler (örneğin şişme-büzülme davranışı, donma kaynaklı kabarma, farklı oturma ve su içeriği değişimleri gibi) taşıma gücünde zayıflamalara ve ek gerilmelere yol açmamalı ya da bu etkiler, yapının performansını olumsuz etkilemeyecek düzeyde kalmalıdır (bkz. Şekil 1). Bu nedenle mühendislik uygulamalarında, yapıların yeterli taşıma kapasitesi ve deformasyon kontrolü sağlayan zeminler üzerine oturtulması genel kabul gören bir yaklaşımdır. Ancak, bina, köprü, yol ve baraj gibi önemli mühendislik yapılarına ev sahipliği yapacak zeminler her zaman istenilen niteliklerde olmayabilir. Özellikle kentleşmenin hızla artması ve sanayi alanlarının genişlemesiyle birlikte uygun mühendislik özelliklerine sahip zeminlerin bulunabilirliği azalmış, bu da düşük dayanım ve yüksek deformasyon potansiyeline sahip zayıf zeminler üzerine yapı inşasını kaçınılmaz hale getirmiştir. Bu gelişmeler doğrultusunda, yetersiz zemin koşullarının neden olduğu mühendislik sorunlarına yönelik uygun iyileştirme yöntemlerinin geliştirilmesi ve uygulanması gerekliliği doğmuştur. Zayıf zemin koşullarının mevcut olduğu durumlarda, geoteknik mühendisleri genel olarak üç temel çözüm seçeneğinden birini değerlendirmek ve uygulamak durumundadır. Bunlar; mevcut zemin koşullarını herhangi bir müdahalede bulunmaksızın olduğu gibi kabul etmek, yetersiz zemini yerinden çıkararak yerine daha uygun mühendislik özelliklerine sahip bir zemin yerleştirmek veya mevcut zemini çeşitli iyileştirme teknikleriyle istenen özelliklere kavuşturmak şeklinde özetlenebilir. Her bir yaklaşım, projenin yapısal gereksinimleri, ekonomik kısıtları ve çevresel koşulları doğrultusunda teknik değerlendirmelere tabi tutulmalıdır.

Şekil 1 Zemin kabarması nedeniyle oluşan yapısal hasarlar



Kaynak: Al-Rawas vd., 2005

İlk seçenek, mevcut zayıf zemin özellikleri dikkate alınarak, bu zemin üzerine inşa edilecek mühendislik yapılarının (örneğin mühendislik dolguları, sanat yapıları vb.) temel sistemlerinin, zeminden kaynaklanan olumsuzluklara karşı yeterli dayanımı sağlayacak şekilde özel olarak tasarlanmasını içerir. Ancak bu yaklaşım, çoğu zaman yapının daha büyük boyutlarda ve maliyetli olarak tasarlanmasını zorunlu kıldığından, ekonomik açıdan sürdürülebilir değildir. Ayrıca, uzun vadede zemin kaynaklı problemlerin (oturma, taşıma gücünün azalması vb.) yapının performansı, hizmet süresi ve bakım-onarım gereksinimleri üzerinde olumsuz etkiler doğurabileceği geçmiş uygulamalardan bilinmektedir. İkinci seçenek ise uygun olmayan zeminlerin yerinden kazılarak uzaklaştırılması, bu zeminin uygun bir alanda depolanması, yerine konulacak mühendislik açısından elverişli malzemenin temin edileceği bir ocaktan çıkarılması, bu malzemenin inşaat sahasına taşınması ve ardından uygun şekilde serilerek sıkıştırılması gibi işlemleri kapsamaktadır. Bu yöntem, süreç açısından oldukça zaman alıcı olmasının yanı sıra, yüksek nakliye ve işçilik maliyetleri nedeniyle ekonomik açıdan ciddi yükler getirebilmektedir. Üçüncü ve genellikle daha tercih edilen yaklaşım ise, çeşitli zemin iyileştirme teknikleri kullanılarak doğal zeminin mühendislik özelliklerinin artırılması ve bu şekilde yapıların güvenle inşa edilmesidir (Tunç, 2002). Bu yöntem hem ekonomik hem de teknik açıdan sürdürülebilir çözümler sunması bakımından uygulamada geniş kabul görmektedir.

Ülkemizde genellikle birbirinin yerine kullanılan “zemin iyileştirmesi” ve “zemin stabilizasyonu” kavramları, teknik açıdan bazı önemli farklılıklar

içermektedir. Zemin iyileştirmesi, daha geniş kapsamlı bir terim olup; zeminin yoğunluğu, geçirimliliği, ısı iletkenliği, şişme ve büzülme davranışı, göçme durumu ve yapısal bütünlüğü gibi özelliklerinin değiştirilmesini veya iyileştirilmesini amaçlayan uygulamaları ifade eder. Bu tür iyileştirme çalışmaları, zemin özelliklerinin genel anlamda geliştirilmesine yöneliktir. Öte yandan zemin stabilizasyonu ise, daha özel bir durumu ifade eder. Örneğin, bir yapı parselinde temelin makul bir derinliğe oturtulmasına rağmen, mevcut zemin ya da kaya biriminin hedeflenen taşıma gücünü sağlayamaması veya oturma sınır değerlerinin üzerinde deformasyon göstermesi durumunda stabilizasyon tekniklerinin uygulanması gereklidir. Stabilizasyon; zeminin sıkışabilirliğinin azaltılması, kayma mukavemetinin artırılması ve sıvılaşma potansiyelinin ortadan kaldırılması gibi mühendislik parametrelerinin kontrol altına alınmasını hedefler (Önalp & Sert, 2006).

2. Zemin Stabilizasyon Teknikleri

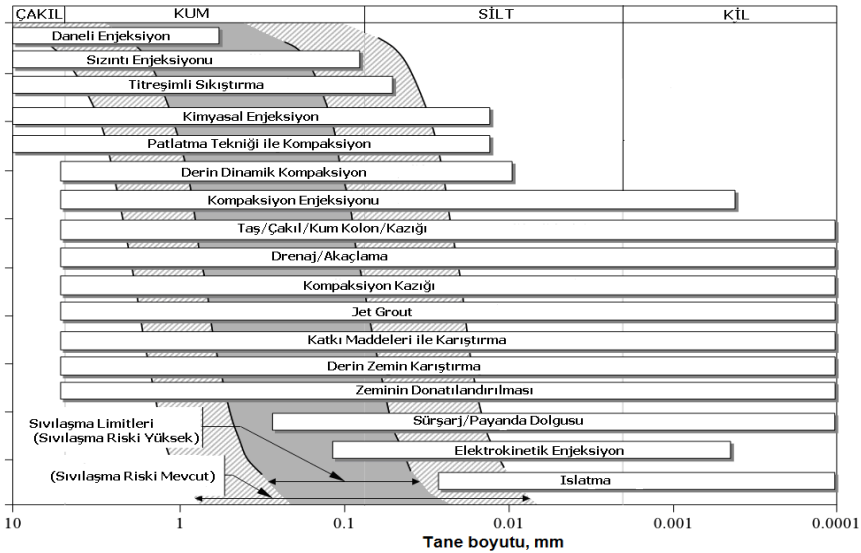
Yapılarının inşa edilmesinde karşılaşılan yetersiz zemin koşulları, yapı güvenliği ve performansı açısından ciddi riskler doğurabilmektedir. Bu tür zeminlerle karşılaşıldığında en temel çözüm yaklaşımları; yetersiz taşıma kapasitesine sahip zeminin kazılarak alandan uzaklaştırılması ve yerine uygun mühendislik özelliklerine sahip malzemenin getirilip katmanlar halinde sıkıştırılması ya da zayıf zeminin taşıma gücünü aşmadan yapı yüklerini aktarabilecek geniş ve derin temel sistemlerinin kullanılmasıdır (Ingles & Metcalf, 1973). Ancak, her iki yöntemin hem uygulama süreci açısından karmaşık hem de ekonomik açıdan maliyetli olduğu bilinmektedir. Ayrıca, bu tür çözümlerin uzun vadede zemin kaynaklı deformasyonlar, yapının hizmet süresi boyunca karşılaşılabileceği performans kayıpları ve artan bakım-onarım gereksinimleri gibi olumsuzluklara neden olabileceği çeşitli saha deneyimlerinden anlaşılmaktadır. Bu nedenlerle, mevcut zeminin yerinde iyileştirilmesi amacıyla çeşitli zemin stabilizasyon yöntemlerinin uygulanması, teknik ve ekonomik açıdan çoğu zaman daha uygun bir çözüm olarak değerlendirilmektedir. Başlangıçta maliyetli gibi görünse de zemin stabilizasyonu; yapı güvenliğinin artırılması, üstyapı deformasyonlarının kontrolü ve uzun vadeli bakım maliyetlerinin düşürülmesi gibi avantajlar sağlayarak toplam inşaat maliyetini optimize etmektedir. Zemin stabilizasyon tekniklerinin uygulanması ile şu kazanımlar sağlanabilir:

- Zemin kayma direncinin artırılması yoluyla taşıma gücünün yükseltilmesi,
- Temel sistemlerinde meydana gelebilecek oturma miktarlarının azaltılması,
- Oturmaların kontrol altına alınması ve hacimsel kararlılığın sağlanmasıyla üstyapıdaki deformasyonların sınırlandırılması,

- Zeminin geçirimsizlik özelliklerinin düzenlenmesi (örneğin, hidratlı kireç kullanımı geçirimsizliği artırabilir),
- Yer altı suyu drenajının kolaylaştırılması veya boşluk suyu basıncının düşürülmesi,
- Şişme ve büzülme potansiyeli olan zeminlerde hacim değişimlerinin azaltılması,
- Yamaç stabilitesi, dolgu güvenliği ve toprak barajların yapısal bütünlüğünün artırılması.

Geoteknik mühendisinin, zemin iyileştirme yöntemini seçmeden önce zemin biriminin mühendislik özelliklerini ayrıntılı biçimde analiz etmesi ve kısa ya da uzun vadede problem oluşturabilecek davranışları öngörerek en uygun ve ekonomik yöntemi belirlemesi gerekmektedir. Çünkü farklı zemin türleri farklı mühendislik sorunlarına neden olabilir ve dolayısıyla farklı stabilizasyon tekniklerini gerektirir. Aynı şekilde, her bir stabilizasyon amacı için çeşitli uygulama yöntemleri mevcuttur (Çalık, 2012). Zemin türlerine göre uygulanabilecek stabilizasyon tekniklerine ilişkin sınıflamalar Mitchell & Gallagher (1998) ile Hunt (1986, 1994) tarafından Şekil 2 ve Tablo 1’de verilmiş; ayrıca U.S. Army Corps of Engineers (2003), farklı mühendislik amaçlarına yönelik olarak seçilebilecek potansiyel iyileştirme yöntemlerini Tablo 2’de listelemiştir.

Şekil 2 Zemin türüne bağlı olarak önerilen stabilizasyon teknikleri



Kaynak: Mitchell & Gallagher, 1998

Tablo 1 Zemin cinsine bağlı olarak önerilen zemin stabilizasyon yöntemleri

Zemin cinsleri		Stabilizasyon yöntemleri
Çeşitli dolgular	Sığ	Kazı/Geri dolgu
	Derin	Dinamik kompaksiyon, kum kolonlar
Organik zeminler	Sığ	Kazı/Geri dolgu, geotekstil
	Derin	Sürşarj, geotekstil, kum kolonlar
	Tabakalı	Sürşarj, patlatma tekniği, dinamik kompaksiyon, kompaksiyon enjeksiyonu, kum kolonlar, taş kolonlar
Yumuşak killer	Sığ	Kazı/Geri dolgu, geotekstil
	Derin	Sürşarj, geotekstil, kum veya kireç kolonlar
	Tabakalı	Sürşarj, dinamik kompaksiyon, kompaksiyon enjeksiyonu, kum veya kireç kolonlar
Killer		Mekanik stabilizasyon, kireç stabilizasyonu, termal(dondurma), elektro-osmoz, geosentetik, drenaj
Gevşek siltler	Sığ	Kazı/Geri dolgu, tuz katkısı
	Derin	Dinamik kompaksiyon, sürşarj, taş kolonlar, elektro-osmoz, vakum kuyuları
Gevşek kumlar	Sığ	Çimento veya bitüm stabilizasyonu, dinamik kompaksiyon
	Derin	Vibroflatasyon, vibrokompaksiyon, dinamik kompaksiyon, enjeksiyon, taş kolonlar, drenaj kuyuları, termal (dondurma)
Sıvılaşabilen zeminler		Dinamik kompaksiyon, enjeksiyon, taş kolonlar, drenaj
Şişen zeminler		Kireç stabilizasyonu, drenaj, çimento, uçucu kül, tuz, kimyasal katkıları
Çatlaklı kayalar		Enjeksiyon, ankraj, şatkrit, yüzey altı yatay drenaj

Kaynak: Hunt, 1986 ve Hunt, 1994

Tablo 2 Zemin Stabilizasyonu Amacına Yönelik İslah Yöntemleri

Amaçlar	Stabilizasyon Yöntemleri
Sıvılaşma direncini artırmak. Deplasmanları azaltmak.	Vibrokompaksiyon Taş kolonlar Derin dinamik kompaksiyon Patlayıcı tekniği ile kompaksiyon Çakıl kolonlar Jet grout Kompaksiyon enjeksiyonu Granüler kolonlar (kum ve çakıldan)
Farklı oturmaya maruz kalabilecek yapıların zeminlerini ıslah etmek. Farklı oturma, deformasyon ve kırılma direncini arttırmak.	Kompaksiyon enjeksiyonu Jet grout Mini kazıklar
Ani oturmaları azaltmak.	Vibrokompaksiyon Derin dinamik kompaksiyon Patlayıcı tekniği ile kompaksiyon Kompaksiyon enjeksiyonu Jet grout Granüler kolonlar (kum ve çakıldan)
Konsolidasyon oturmasını azaltmak.	Ön yükleme (sürşarj) Jet grout Kompaksiyon enjeksiyonu Taş kolonlar Elektro-osmoz
Konsolidasyon oturması oranını arttırmak.	Sürşarj dolgu/dolgunsuz düşey drenler Granüler kolonlar (kum ve çakıldan)

Şev stabilitesini arttırmak.	Payanda dolgusu Çakıl drenler Granüler kolonlar (kum ve çakıldan) Kompaksiyon enjeksiyonu Jet grout Zemin çivisi ve vidaları
Şişen zeminleri ıslah etmek.	Kireç stabilizasyonu Çimento stabilizasyonu Mekanik stabilizasyon Drenaj
Erozyon direncini arttırmak.	Bioteknik stabilizasyon Mekanik stabilizasyon
Sızıntı yollarını kapamak ve/veya su akımı doğrultusundaki borulanmayı azaltmak.	Kompaksiyon Kompaksiyon enjeksiyonu Penetrasyon enjeksiyonu
Çatlaklardan ve birleşim yerlerinden su kaçaklarını engellemek.	Kompaksiyon enjeksiyonu
Göçen zeminleri ıslah etmek.	Derin dinamik kompaksiyon Vibrokompaksiyon Enjeksiyon

Kaynak: U.S. Army Corps. of Eng., 2003

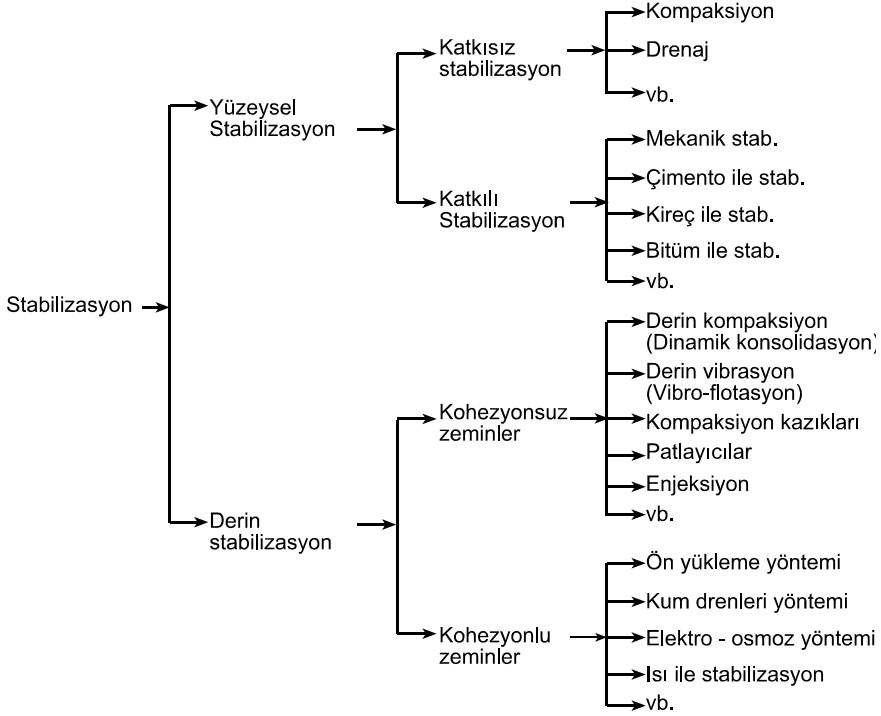
Van Impe (1989), zemin stabilizasyon yöntemlerini farklı bir sınıflandırmaya tabi tutarak; geçici ve yüzeysel (kozmetik) etkili yöntemler bu yöntemler, kalıcı ancak dış katkı maddesi kullanılmadan uygulanan yöntemler ve kalıcı etkili ve dışsal malzeme ya da katkı ile gerçekleştirilen yöntemler olmak üzere üç temel kategori altında toplamıştır. Geçici ve kozmetik nitelikteki yöntemler, genellikle kısa vadeli etkileri olan ve özel durumlarda ihtiyaç duyulan uygulamalardır. Yeraltı su seviyesinin düşürülmesi, zeminin dondurulması veya elektro-osmoz (elektro kinetik) gibi teknikler bu gruba dâhildir. Söz konusu yöntemler, inşaat faaliyetleri süresince geçici bir çözüm sunar; yapı tamamlandıktan sonra uygulamaları sona erdiği gibi, etkileri de ortadan kalkar. Yüksek maliyetli olmalarına karşın, hızlı ve etkili çözümler sunabilmeleri sebebiyle tercih edilirler. İkinci grup ise, zemine herhangi bir katkı maddesi veya yabancı malzeme ilave edilmeden gerçekleştirilen kalıcı stabilizasyon yöntemlerini kapsamaktadır. Bu teknikler genellikle titreşim yoluyla zeminin yoğunluğunun artırılması ya da ortam sıcaklığının yükseltilerek zemin bileşenlerinin taşlaşmasının sağlanması gibi fiziksel müdahalelerdir. Üçüncü grupta ise, dışsal katkı veya elemanların kullanıldığı kalıcı uygulamalar yer alır. Bu kapsamda çimento, kireç ve çeşitli kimyasal katkıları, çelik donatılar, zemin çivileri ya da drenaj kapasitesi yüksek malzemeler kullanılarak zeminin taşıma gücünün ve dayanımının artırılması hedeflenir.

Yıldırım (2002) ise stabilizasyon tekniklerini farklı bir bakış açısıyla; mekanik, hidrolik, fiziksel-kimyasal ve katkılı yapısal destekli (kütleyi kısıtlamaya yönelik) yöntemler olmak üzere dört ana başlık altında sınıflandırmıştır. Mekanik iyileştirme, zeminin kısa süreli mekanik etkilerle sıkıştırılarak yoğunluğunun artırılmasına dayanır. Yüzeysel tabakalarda statik, darbeli veya titreşimli silindirler ile yapılan sıkıştırma işlemleri; derin zeminlerde ise titreşimle veya patlatma yöntemiyle

gerçekleştirilen sıkıştırma teknikleri bu gruba örnek olarak verilebilir. Ayrıca, sıkıştırma kazıkları kullanılarak yapılan uygulamalar da mekanik iyileştirme kapsamında değerlendirilir. Hidrolik iyileştirme yöntemleri, zeminin boşluk suyu basıncını azaltarak kayma dayanımını artırmayı amaçlayan tekniklerden oluşur. Bu kapsamda, özellikle kaba taneli zeminlerde, kuyu veya hendekler aracılığıyla yeraltı su seviyesinin düşürülmesi yaygın bir uygulamadır. İnce taneli zeminlerde ise, düşey drenlerin kullanımıyla birlikte uygulanan ön yükleme teknikleri tercih edilir. Bunun yanı sıra, elektriksel potansiyel farkları kullanılarak boşluk suyunun ortamdaki uzaklaştırılması da bu gruba dahil edilebilecek yöntemler arasındadır. Hidrolik stabilizasyonda geosentetik malzemeler, geleneksel uygulamalara önemli katkılar sağlamaktadır. Geomembranlar, diyafram duvarlar ve palplanş sistemleri gibi yapı elemanları, suyun geçişini kontrol altına alarak zemin davranışını iyileştirme sürecinde etkin rol oynar. Ayrıca, keson yapılarında ve tünel inşaatlarında basınçlı hava kullanımı ile yeraltı suyunun ortamdaki uzaklaştırılması gibi uygulamalar da hidrolik iyileştirme yöntemleri kapsamında değerlendirilmektedir.

Uzuner (2011), zemin stabilizasyon yöntemlerini sistematik bir yaklaşımla sınıflandırarak, bu yöntemleri uygulama derinliğine bağlı olarak **yüzeysel stabilizasyon** ve **derin stabilizasyon** olmak üzere iki ana kategoriye ayırmıştır. Yüzeysel stabilizasyon, genellikle zemin yüzeyine yakın tabakalarda uygulanan ve kısa vadede etkili olan yöntemleri kapsarken; derin stabilizasyon, daha büyük derinliklerdeki zeminlerin iyileştirilmesini hedefleyen ve çoğunlukla yapısal bütünlüğü artırmayı amaçlayan teknikleri içermektedir. Bu çerçevede, **Şekil 2**, **Tablo 1** ve **Tablo 2**'de çeşitli stabilizasyon tekniklerine ilişkin temel bilgiler sunulmuş; yöntemlerin işleyiş prensipleri, uygulama alanları ve zemin türlerine göre uygunlukları ortaya konmuştur. Uzuner (2011) ise, bu temel sınıflandırmayı esas alarak, **Şekil 3**'te her iki stabilizasyon türünü, alt teknik başlıklar altında daha ayrıntılı bir biçimde gruplandırmıştır. Bu alt gruplandırmalar kapsamında; mekanik sıkıştırma, kimyasal katkı ile iyileştirme, drenaj sistemleriyle su içeriğinin kontrolü, enjeksiyon teknikleri, donma veya ısıtma ile stabilizasyon gibi farklı mühendislik yaklaşımlarına yer verilmiştir. Böylece, zemin iyileştirme uygulamalarının seçiminde dikkate alınması gereken en önemli etkenlerden biri olan uygulama derinliğini temel alarak, mühendislik kararlarının daha bilinçli ve amaca uygun şekilde verilmesine olanak tanıyan bir sınıflandırma modeli sunmuştur.

Şekil 3 Zemin cinsine bağlı olarak önerilen zemin stabilizasyon yöntemleri



Kaynak: Uzuner, 2011

Zemin stabilizasyonu çalışmaları, farklı mühendislik amaçlarına hizmet eden çok yönlü bir iyileştirme sürecidir. Bu uygulamalarla birlikte; zeminlerin kayma dayanımının ve taşıma gücünün artırılması, hacimsel değişimlere (büzülme ve kabarma) karşı direncin yükseltilmesi, geçirimsizliğin iyileştirilmesi yoluyla drenaj performansının artırılması, konsolidasyon oturmalarının azaltılması ya da hızlandırılması ve değişen çevresel koşullar altında zemin davranışının sürdürülebilir hâle getirilmesi gibi pek çok mühendislik kazanımı elde edilebilmektedir. Ancak, her stabilizasyon çalışmasında bu hedeflenen iyileştirmelere ulaşmak mümkün olmayabilir. Sahada karşılaşılan çeşitli teknik, çevresel ve ekonomik kısıtlamalar stabilizasyon uygulamalarının başarısını doğrudan etkileyebilmektedir. Mitchell (1976) tarafından vurgulanan ve stabilizasyon kalitesini etkileyen başlıca faktörler; zemin türü, yapı karakteristikleri, ıslah edilecek alanın boyutları, zeminin mühendislik özellikleri, oturma kriterleri, malzeme temini ve kalitesi, insan kaynağı ve ekipman, çevresel etkiler, yerel bilgi birikimi ve ekonomik koşullar, olarak sıralanabilir. Zemin stabilizasyon faaliyetleri, ilk bakışta standart ve tekrarlanabilir mühendislik uygulamaları gibi görünse de çok sayıda değişkenin eş zamanlı olarak değerlendirilmesini gerektiren karmaşık bir süreçtir. Bu nedenle, geoteknik mühendisinin deneyimi, sürecin başarısında

belirleyici bir faktördür. Aksi takdirde, yetersiz bilgi ya da uygulama hataları nedeniyle hem teknik açıdan yetersiz hem de ekonomik olarak verimsiz sonuçlarla karşılaşmak olasıdır.

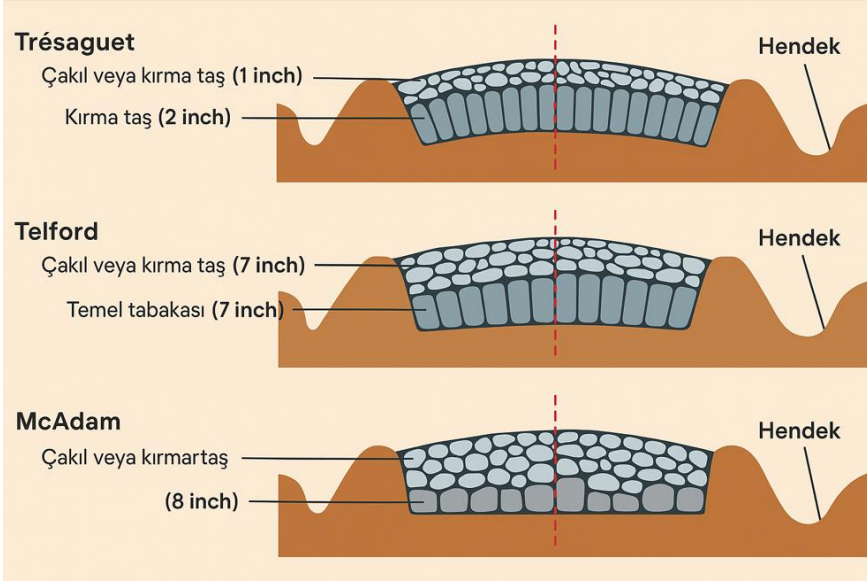
2.1.Yüzeysel Stabilizasyon

Zemin stabilizasyon çalışmalarında, mevcut zemine herhangi bir katkı maddesi eklenmeden gerçekleştirilen iyileştirme türüne katkısız (doğal) stabilizasyon adı verilir. Bu yöntem, zeminin mevcut granülometrik dağılımının elverişli olması durumunda etkili sonuçlar verebilir. Katkısız stabilizasyonun başlıca örnekleri arasında kompaksiyon (sıkıştırma) ve drenaj yer almaktadır. Kompaksiyon, zeminin belirli kalınlıklarda tabaka serilerek, uygun özellikteki sıkıştırma ekipmanlarıyla birkaç geçişte sıkıştırılması işlemidir. Bu işlem sayesinde zeminin yük altında deformasyon kabiliyeti azaltılır, su içeriğinde meydana gelebilecek değişimlere karşı hacimsel kararlılığı artırılır ve taşıma gücü iyileştirilir. Kompaksiyon işleminin verimli bir şekilde yapılabilmesi için, zeminin optimum su muhtevası laboratuvar ortamında kompaksiyon deneyleriyle belirlenir. Daha sonra saha uygulaması bu su içeriğine göre gerçekleştirilir. Sıkıştırma kalitesi ise, genellikle rölatif kompaksiyon değeri üzerinden değerlendirilir. Öte yandan, drenaj, zemindeki fazla suyun uzaklaştırılması amacıyla gerçekleştirilen işlemleri kapsar. Yüzey drenajı, yağmur ve kar suları gibi yüzeysel suların zemin içerisine sızmasını ve buna bağlı olarak erozyon, yüzey yumuşaması gibi olumsuzlukları engellemeyi hedefler. Bu amaçla yüzeydeki sular toplanarak kontrollü biçimde saha dışına yönlendirilir.

2.1.1.Mekanik Stabilizasyon

Mekanik stabilizasyon, farklı özelliklere sahip iki ya da daha fazla zeminin uygun oranlarda karıştırılarak, hedeflenen mühendislik özelliklerine sahip yeni bir zemin oluşturulması sürecidir (Aytekin, 2004). Bu yöntemde genellikle ince taneli (kohezyonlu) zeminlere belirli miktarda kaba taneli (granüler ve kohezyonsuz) malzeme ilave edilerek zemin özellikleri iyileştirilir. Bu nedenle, bu tür uygulamalar literatürde sıklıkla “granüler stabilizasyon” olarak da adlandırılmaktadır. Tarihsel olarak mekanik stabilizasyonun ilk örneklerine Babil ve Roma dönemlerinde inşa edilen yol yapılarında rastlanmaktadır. Bu uygarlıklar, yolların trafik yükleri altında yüzey stabilitesini koruyabilmesi amacıyla zayıf zeminlerin üzerine büyük taş blokları yerleştirerek yol tabanlarını oluşturmuşlardır. Bu teknik, özellikle 19. yüzyılda geliştirilen Tresaguet, Telford ve McAdam tipi yol tasarımlarında daha ekonomik ve etkili biçimde uygulanmıştır (bkz. Şekil 4). Söz konusu modern yollar, her ne kadar eski dönemlerdeki gibi iri taş bloklar içermese de kırmataş ve çakıl malzemelerinin farklı boyutlarda kullanımıyla oluşturulan tabakalar sayesinde benzer şekilde stabilize sağlamaktadır. Özellikle üst tabakalarda kullanılan daha küçük boyutlu kırmataşların birbiriyle kenetlenmesi, yapının dayanımını artıran temel etkidir.

Şekil 4 Tarihi yol tiplerinin katmanlı yapısı



Kaynak: Ingles ve Metclaf, 1973

Mekanik stabilizasyon, iyileştirilmesi gereken doğal zeminin kazılarak, mekanik özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla çeşitli işlemlerden geçirilmesi ve sonrasında tekrar yerine yerleştirilmesi sürecini kapsamaktadır (Edil vd., 2002). Zemin ile karışım işlemi; sahada doğrudan, sabit ya da mobil plantlerde veya malzeme ocaklarında gerçekleştirilebilir. Elde edilen karışım, uygun yöntemlerle yola serilir ve mühendislik normlarına uygun şekilde sıkıştırılır. Bu yöntemin temel hedefleri arasında; zemin gradasyonunun iyileştirilmesi, likit limit ile plastisite indisinin azaltılması, drenaj kapasitesinin artırılması, uzun vadeli oturma davranışlarının kontrol altına alınması, don etkisine karşı duyarlılığın azaltılması, kapiler su yükselmesinin sınırlandırılması ve zemin dayanımı ile dayanıklılığının artırılması yer almaktadır (Winterkorn & Fang, 1975). Mekanik stabilizasyonda uygulanacak karışım oranları için evrensel olarak kabul edilmiş tek bir yöntem bulunmamaktadır. Bu nedenle farklı zemin türlerinden çeşitli oranlarda deneysel karışımlar hazırlanmakta ve elde edilen örneklerin mühendislik özellikleri değerlendirilerek uygun oran belirlenmektedir. Özellikle ince taneli (çoğunlukla %50'den fazla 200 No'lu elekten geçen) kohezyonlu zeminlerin granüler malzemelerle –örneğin kum, çakıl, kırmataş, alüvyon, teras malzemesi veya yamaç molozu– belirli oranlarda karıştırılmasıyla istenen mekanik ve hidrolik özellikler sağlanabilmektedir. Bu yöntemle elde edilen karışımın tane dağılımı ve ince fraksiyonunun plastisite özellikleri, stabilizasyonun başarısında belirleyici rol oynamaktadır. Bilindiği üzere, gradasyon; zeminin sıkışabilirliği, geçirgenliği, stabilitesi ve su tutma kapasitesi gibi

birçok mühendislik özelliğini doğrudan etkilemektedir. Sürekli bir gradasyon sağlandığında, en yoğun zemin yapısı elde edilmekte, segregasyon eğilimi azalarak işlenebilirlik artmaktadır (Jewell, 1969). Mekanik stabilizasyonda temel amaç, en yüksek zemin yoğunluğunun elde edilmesi olduğundan, gradasyonun sürekliliği büyük önem taşımaktadır.

2.1.2.Kimyasal Stabilizasyon

Kimyasal stabilizasyon, zeminin mühendislik özelliklerinin çeşitli katkı maddeleri ile geliştirildiği bir iyileştirme yöntemidir. Bu yöntemde kullanılan katkılar genellikle ekonomik olmaları ve temin edilebilirliklerinin yüksek olması nedeniyle tercih edilmektedir. Sıklıkla kullanılan katkı malzemeleri arasında; kireç, çimento, bitüm, puzolanlar, belirli kimyasal bileşikler (örneğin hidroflorik asit, fosforik asit, sodyum silikat, klorürler, fosfatlar, kalsiyum sülfat, sodyum hidroksit, alüminyum tuzları gibi), reçineler ve polimer esaslı malzemeler yer almaktadır. Bu tür katkılar zeminde çeşitli kimyasal reaksiyonlar oluşturarak, zemin dokusunu ve davranışını önemli ölçüde değiştirmekte; dayanım, rijitlik ve deformasyon özelliklerini iyileştirmektedir. Bu bağlamda, kimyasal stabilizasyon, özellikle düşük taşıma kapasitesine sahip zeminlerde, kalıcı ve ekonomik bir çözüm sunan etkili bir yöntem olarak değerlendirilmektedir (Tunç, 2002).

2.1.2.1.Kireç ile Zemin Stabilizasyonu

Kireç stabilizasyonu yönteminde, zemine genellikle kuru ağırlığının %5 ila %10'u arasında değişen oranlarda kireç ilavesi yapılmaktadır. Bu yöntem, özellikle kohezyonlu zeminler üzerinde etkilidir; çünkü kireç, zemin taneleri arasında kimyasal bağlar oluşturarak plastisite indisini düşürmekte ve böylece zeminin işlenebilirliğini artırmaktadır. Uygulanacak optimum kireç miktarının belirlenmesi amacıyla çoğunlukla serbest basınç dayanımı gibi laboratuvar deneyleri kullanılmaktadır. Ayrıca, bu sürece destek olarak, %10 ila %20 oranında uçucu kül ilavesiyle zemin özelliklerinin daha da iyileştirilmesi mümkün olmaktadır. Kireçle gerçekleştirilen zemin stabilizasyon çalışmalarında genellikle iki temel kireç türü kullanılmaktadır: sönmüş kireç (hidrate kireç, Ca(OH)_2 – kalsiyum hidroksit) ve sönmemiş kireç (CaO – kalsiyum oksit). Bunların yanı sıra piyasada yaygın olarak bulunan tarım kireci (CaCO_3 – kalsiyum karbonat) da mevcuttur. Ancak tarım kireci, sulu ortamda kimyasal reaksiyona girme yeteneğinden yoksun olduğundan, stabilizasyon amacıyla kullanımı sınırlıdır; bu tür malzeme yalnızca bazı uygulamalarda gradasyonu iyileştirmek üzere dolgu malzemesi (filler) olarak tercih edilmektedir. Kireç üretiminde temel hammadde olarak kireçtaşı (kalker) kullanılmaktadır. Kireçtaşının içerisinde %30'a kadar magnezyum karbonat (MgCO_3) içeren türleri de (örneğin dolomit) bu amaçla kullanılabilir. Saf kireçtaşından elde edilen kireç genellikle beyaz renkte olurken, MgCO_3 içeren kayalardan üretilen kireçler daha esmer tonlardadır ve mukavemet bakımından bir miktar daha yüksek değerlere ulaşabilmektedir. Kireç üretimi sürecinde, öğütülmüş

kireçtaşı yaklaşık 900°C ve üzeri sıcaklıklarda döner fırınlarda pişirilerek kalsinasyon adı verilen reaksiyon gerçekleştirilir. Bu süreçte aşağıdaki kimyasal dönüşüm meydana gelir:



Bu reaksiyon sonucunda elde edilen ürün, sönmemiş kireç (CaO) olarak adlandırılır. Yapılan araştırmalar, sönmemiş kirecin zemin iyileştirme performansı açısından daha etkili olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, CaO formundaki kireç oldukça reaktif ve ciltle temas ettiğinde yakıcı özellikte olduğu için, sahada kullanım sırasında iş güvenliği açısından ciddi riskler barındırır. Ayrıca sönmemiş kireç, taşıma ve depolama aşamalarında havadaki nem ile reaksiyona girerek serbest CaO içeriğini azaltmakta, bu da stabilizasyon etkinliğini düşürmektedir. CaO'nun su ile teması durumunda oldukça yüksek miktarda ısı açığa çıkar ve aşağıda verilen kimyasal tepkime oluşur:



Bu tepkimeye kirecin söndürülmesi denir ve ortaya çıkan ürün sönmüş kireç (Ca(OH)₂) olarak tanımlanır. Stabilizasyon uygulamalarında hangi tür kirecin tercih edileceği; zemin tipi, uygulama koşulları, iş güvenliği gereklilikleri ve ekonomik değerlendirmeler doğrultusunda belirlenmelidir (Baradan, 2000). Kireçle gerçekleştirilen zemin stabilizasyonu uygulamalarında genellikle hidrate kireç (sönmüş kireç) tercih edilmektedir. Bu malzemenin, sönmemiş kirece kıyasla yakıcı etkisinin düşük olması, sahada kullanımını daha güvenli hale getirmektedir. Saha uygulamalarında kireç, çoğunlukla kuru formda doğrudan zemine karıştırılarak uygulanmaktadır. Ancak işçi sağlığı ve güvenliği açısından son yıllarda kireçli su çözeltilerinin kullanımı da tercih edilen alternatif uygulama yöntemlerinden biri haline gelmiştir. Kireç stabilizasyonu, özellikle plastisite indeksi (PI) 10 ile 50 arasında değişen killi zeminlerde yüksek verimlilik sağlamaktadır. Bu bağlamda, kireç katkısının etkili olabilmesi için zeminin belirli miktarda kil ve silt içeriğine sahip olması gereklidir. Zira kireç, bu ince taneli zemin bileşenleriyle reaksiyona girerek plastisiteyi azaltmakta, şişme ve büzülme potansiyelini düşürmekte ve bunun yanında işlenebilirlik, dayanım ve uzun vadeli stabilite (durabilite) açısından olumlu gelişmeler sağlamaktadır. Kireç ve suyun karıştırılmasıyla elde edilen çözelti, yaklaşık olarak 12.4 pH değerine sahiptir. Başlangıç kireç oranının tayininde; zemin ve katkı maddesinin toplam kütlesi 20 gram olacak şekilde damıtılmış su ile süspansiyon hazırlanır. Bu süspansiyonun pH değeri ölçülerek, farklı kireç oranlarında hazırlanan süspansiyonların pH değerleri bir grafik üzerinde gösterilir. Grafik üzerinde 12.4 pH seviyesine karşılık gelen kireç oranı, başlangıç katkı miktarı olarak kabul edilir. Bu oranın bir miktar altı ve üstünde yapılacak deneylerle, zemin

özellikleri açısından en uygun katkı oranı belirlenebilir (Aytekin, 2004). Ayrıca bu analiz sürecinde, Tablo 3’te verilen zemin türlerine göre önerilen kireç oranları, mühendislik kararları için yol gösterici olarak kullanılabilir.

Tablo 3 Başlangıç için önerilen optimum kireç oranı

Zemin türü	Kireç oranı, kuru zeminin ağırlıkça yüzdesi (%)
İyi derecelenmiş killi çakıl	3
Kum, organik zeminler	Tavsiye edilmez
Kumlu kil	5
Siltli kil	2-4
Plastik kil	3-8
Yüksek plastisiteli kil	3-10

Kaynak: Aytekin,2004

2.1.2.2.Çimento ile Zemin Stabilizasyonu

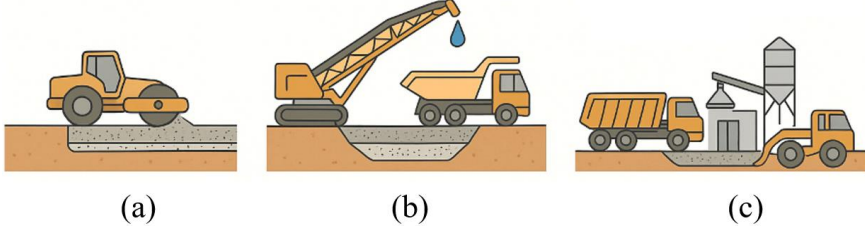
Çimento stabilizasyonu, zeminin mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla, zemin içerisine belirli oranda çimento ilave edilerek gerçekleştirilen bir iyileştirme yöntemidir. Bu yöntemde, genellikle zeminin kuru ağırlığının %5 ila %15’i arasında değişen oranlarda çimento karıştırılmakta ve ardından kompaksiyon uygulanmaktadır. Portland çimentosu, bu uygulamalarda en yaygın kullanılan bağlayıcıdır. Yöntem, özellikle organik ve saf kohezyonlu zeminler dışında kalan çoğu zemin tipi için uygunluk göstermektedir. Çimento, zemin taneleri arasında bağlayıcı bir ağ oluşturarak dayanımı artırır. Kullanılacak optimum çimento miktarı; serbest basınç dayanımı ve diğer mühendislik deneyleri yoluyla belirlenmektedir. Karışımın hazırlanmasında, zemine yeterli miktarda su da eklenmelidir. Bu su miktarı, çimentonun hidrasyon reaksiyonunun gerçekleşmesi ve sertleşmenin sağlanması açısından kritik öneme sahiptir. Eğer zemin yüksek oranda ince taneli malzeme içeriyorsa, optimum su muhtevasının biraz üzerinde bir nem içeriği tercih edilebilir. Hazırlanan ve sıkıştırılan zemin, beton uygulamalarına benzer biçimde kür işlemiyle nemli tutulmalı, böylece çimentonun bağlayıcılık etkisi tam olarak gelişmelidir. Çimento katkısı ile yapılan stabilizasyon işlemlerinde, çimento oranını azaltmak veya dayanımı artırmak gibi hedeflerle bazı yardımcı malzemeler de karışıma ilave edilebilmektedir. Özellikle termik santrallerin ve kalorifer kazanlarının atığı olan uçucu kül, bu tür yardımcı malzemeler arasında yer almaktadır. Saha uygulamalarında çimento stabilizasyonu üç temel yöntemle gerçekleştirilmektedir (bkz. Şekil 5):

Yerinde Karıştırma Yöntemi: Zemine serilen çimento, yüzeye homojen biçimde dağıtılır; ardından mekanik karıştırıcılarla karıştırılarak kompaksiyon uygulanır.

Gezici Santral Yöntemi: Mobil karıştırma sistemleri aracılığıyla, zeminin üst tabakası kazılarak alınır, çimento ve su ile karıştırılır, ardından yüzeye geri serilip sıkıştırılır.

Sabit Santral Yöntemi: Zemin malzemesi sabit bir tesise taşınır; burada çimento ve su ile karıştırılarak hazırlanır. Daha sonra, hazırlanan karışım saha alanına nakledilir ve yerine serilip kompakte edilir (Uzuner, 2010).

Şekil 5 Çimento stabilizasyonunda kullanılan başlıca uygulama yöntemleri: a) Yerinde karıştırma yöntemi, b) Gezici santral yöntemi, c) Sabit santral yöntemi



2.1.2.3.Bitüm ile Zemin Stabilizasyonu

Bitüm ile stabilizasyon, genellikle asfalt, katran gibi petrol türevi bağlayıcıların kullanıldığı bir zemin iyileştirme yöntemidir. Bu yöntemde; kırmataş, çakıl, kum gibi granüler yapıdaki zemin malzemelerine, sıcak halde sıvı formda bulunan bitümlü bağlayıcılar belirli oranlarda eklenir. Karışım, uygun şekilde karıştırıldıktan sonra zemine serilir ve kompaksiyon işlemi uygulanarak stabil bir yapı elde edilir. Bitümlü bağlayıcılar, zemin taneleri arasında hem kohezyon sağlayarak bir bağlayıcı rolü üstlenir, hem de oluşan yapının geçirimsizliğini artırarak suya karşı direncini yükseltir. Asfalt ve benzeri bitüm esaslı malzemeler, petrokimya endüstrisinden elde edilen, koyu renkli, yapışkan ve sıcaklıkla akışkanlık kazanan viskoz ürünlerdir. Uygulamada kullanılacak zemin malzemesinin, kil ve organik içeriklerden arındırılmış olması büyük önem taşır. Aksi halde, bağlayıcının mineral taneleriyle etkin şekilde bütünleşmesi engellenebilir. Bitümlü bağlayıcılar genellikle zeminin kuru ağırlığının %5 ila %10'u arasında bir oranla karışıma dâhil edilir. Bu stabilizasyon türü, özellikle yol yapımında yüzey kaplamalarının oluşturulması gibi uygulamalarda yaygın olarak tercih edilmektedir. Bitüm stabilizasyonu, yüzey dayanımının ve suya karşı direncin artırılmasını hedefleyen pratik ve etkili bir yöntemdir.

2.2.Derin Stabilizasyon

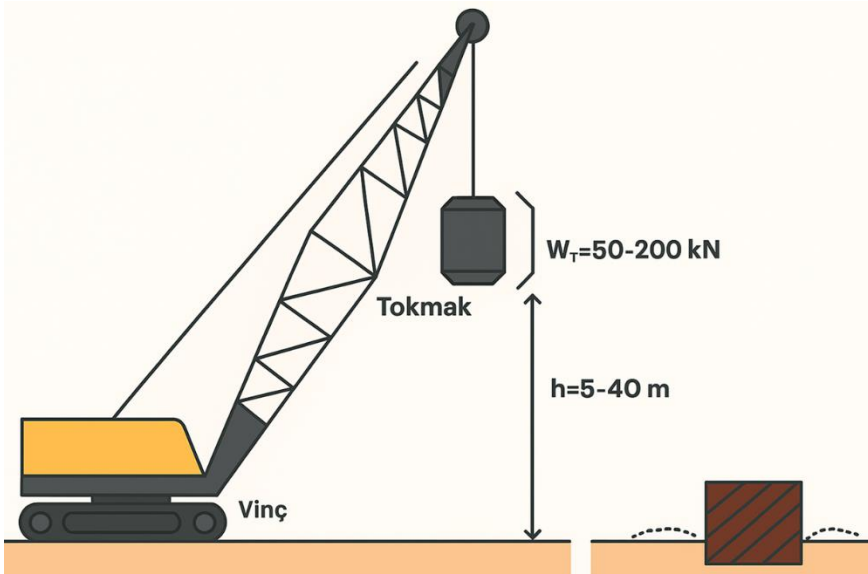
Derin stabilizasyon uygulamalarında iyileştirilecek zemin tabakasının kalınlığı, uygulama türüne ve zemin koşullarına bağlı olarak birkaç metreden onlarca metreye kadar değişkenlik gösterebilmektedir. Derin stabilizasyon süreçlerinde elde edilen sıkıştırma kalitesi, uygulama sahasında belirlenen temsilci noktalarda gerçekleştirilen öncesi ve sonrası zemin deneyleri ile değerlendirilir. Bu amaçla genellikle Standart Penetrasyon Testi (SPT), Konik Penetrasyon Testi (CPT) veya Presiyometre gibi in-situ zemin deneyleri kullanılarak zemin sıkışabilirliği ve taşıma kapasitesi üzerindeki iyileştirici etkiler gözlemlenir. Bu yöntem, lokal olarak bir

noktada yapılan iyileştirmenin, sahada tekrarlanan uygulamalarla geniş alanlara yayılması esasına dayanır. Böylece, hedeflenen mühendislik özelliklerinin tüm saha genelinde elde edilmesi mümkün olur (Uzuner, 2010).

2.2.1.Dinamik Konsolidasyon

Dinamik konsolidasyon, zemin sıkıştırma amacıyla uygulanan ve esas olarak yüksek enerjili darbe prensibine dayanan bir derin zemin iyileştirme yöntemidir. Bu yöntemde, büyük kütleli bir tokmak, belirli yüksekliklerden serbest düşmeye bırakılarak zemin üzerine tekrarlı darbeler uygulanır. Amaç; şok dalgaları ve çarpışma sonucu oluşan plastik deformasyonlar aracılığıyla, zeminin sıkışmasını ve taşıma kapasitesinin artırılmasını sağlamaktır. Tipik olarak kullanılan tokmak ağırlıkları 50 ila 400 kN arasında değişmektedir. Bu ağırlıklar, 5 ila 40 metre yükseklikten serbest bırakılır. Tokmanın düşme yüksekliği ve ağırlığı, zemine aktarılan enerjinin büyüklüğünü belirleyen iki temel parametredir. Tokmaklar genellikle dikdörtgen kesitli, betonarme malzemeden imal edilir ve dış yüzeyleri dayanıklılık sağlamak amacıyla kalın çelik levhalarla kaplanır. Tokmanın zemine çarpmasıyla birlikte, zemin yüzeyinde kraterler oluşur. Çarpmanın oluşturduğu yüksek enerjili şok dalgaları, tanecikleri birbirine yaklaştırarak zeminin boşluk oranını düşürür ve sıkışmayı sağlar. Bu etki yalnızca yüzeyde değil, birkaç metreye kadar inen derinliklerde de etkili olabilir. Elde edilen sıkışmanın derinliği, uygulama parametrelerine ve zemin tipine bağlı olarak değişmektedir (bkz. Şekil 6).

Şekil 6 Dinamik konsolidasyon yönteminde tokmaklama prensibi ve uygulama şeması

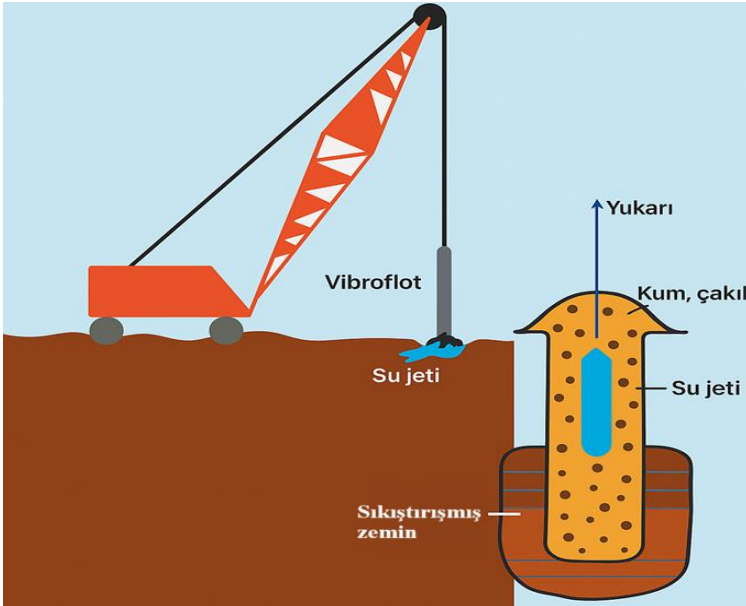


Bu yöntem, özellikle drenajı iyi olan taneli (granüler) zeminler, yani kum, çakıl ve dolgu malzemeleri için oldukça etkilidir. Bu tür zeminlerde, darbe etkisiyle tanecikler arasında yeniden düzenlenme sağlanarak sıkı bir yapı oluşturulabilir. Ancak bazı araştırmalarda, kohezyonlu zeminlerde de bu yöntemin kısmen etkili olabileceği belirtilmiştir. Özellikle çatlaklı veya parça parça yapı gösteren kil zeminlerde, tokmaklama sonrası oluşan titreşimlerin mikro boşlukları kapatarak taşıma kapasitesinde artış sağladığı bildirilmiştir (Menard, 1977). Uygulamanın etkili olduğu derinlik, tokmağın sahip olduğu enerji ile doğru orantılıdır. Uygulama sonrası zemin iyileştirmesinin etkinliği; Standart Penetrasyon Testi (SPT), Koni Penetrasyon Testi (CPT), Presiyometre, plate yükleme deneyleri gibi yerinde testlerle değerlendirilir. Bu testler, uygulama öncesi ve sonrası karşılaştırmalı olarak yapılarak iyileştirmenin miktarı belirlenir. Dinamik konsolidasyon yöntemi, büyük alanlarda ekonomik, hızlı ve etkili bir zemin iyileştirme yöntemi olarak öne çıkmaktadır. Uygulamanın başarısı, zemin tipi, uygulama parametrelerinin doğru seçimi, saha kontrol yöntemleriyle desteklenmesi ve tecrübeli mühendislik gözetimi gibi birçok faktöre bağlıdır.

2.2.2. Derin Vibrasyon (Vibro-Flotasyon) Yöntemi

Vibroflotasyon yöntemi, zemin iyileştirme çalışmalarında kullanılan ve granüler kolonların oluşturulmasını sağlayan bir stabilizasyon tekniğidir. Bu yöntemde, genellikle 1,5 ila 2,5 metre uzunluğunda ve 0,3 ila 0,5 metre çapında olan, “vibroflot” adı verilen silindirik bir vibrasyon cihazı kullanılmaktadır (bkz. Şekil 7).

Şekil 7 Vibroflotasyon yöntemiyle taş kolon oluşturulması – kesit ve uygulama prensibi

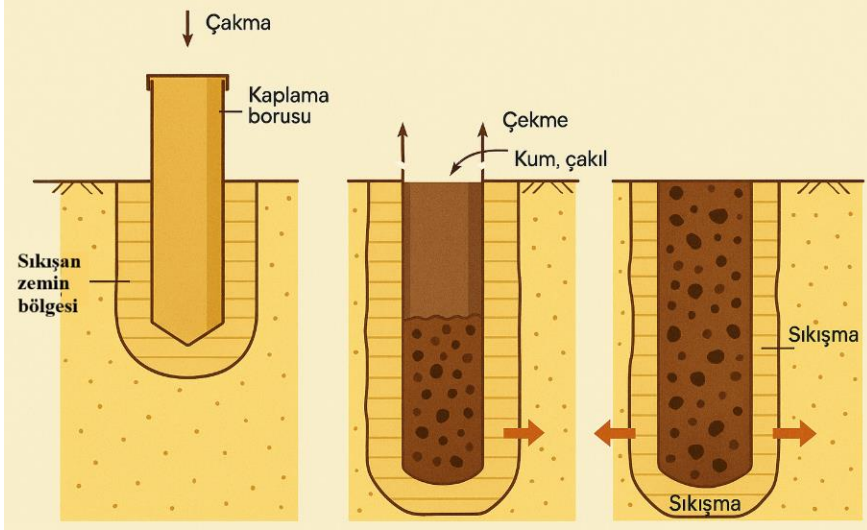


Uygulama öncesinde vibroflot, bir vincin ucuna bağlanarak hedef noktaya taşınır. Cihazın alt kısmında bulunan su jeti sistemi çalıştırılarak, zemine hem suyun basıncı hem de vibroflotun kendi ağırlığı yardımıyla nüfuz etmesi sağlanır. İstenen derinliğe ulaşıldığında, oluşan kuyu kum veya çakıl gibi granüler malzemeyle doldurulur ve bu malzeme daima dolu tutulacak şekilde beslenir. Aynı anda vibratör devreye sokularak, titreşim etkisiyle malzemenin sıkıştırılması gerçekleştirilir. Bu işlem sırasında alt uçtaki su jeti kapatılır, ancak üstten sınırlı miktarda su verilmeye devam edilir. Bu uygulama sonucunda, vibroflotun çevresinde sıkı bir granüler zon oluşur. Cihaz, belirli adımlarla yukarı doğru çekilerek süreç tekrarlanır ve bu sayede yaklaşık 1 ila 2 metre çapında, silindirik bir sıkı zemin kolon elde edilir. Uygulama genellikle plan düzleminde 1 ila 2 metre aralıklarla yapılarak, tüm alan kapsanacak şekilde tekrarlanır. Eğer uygulama yumuşak kil zeminlerde gerçekleştiriliyorsa, bu yöntemle oluşturulan ve çapı yaklaşık 0.5 ila 1 metre arasında değişen, içi çakıl veya kırmataşla doldurulmuş oluşumlar literatürde taş kolonlar olarak adlandırılmaktadır. Benzer amaçla, ucu kapalı bir muhafaza borusunun kil zemine çakılması, ardından borunun geri çekilerek oluşan boşluğun granüler malzeme ile doldurulması yoluyla da taş kolon üretimi yapılabilmektedir. Bu tür uygulamalar, düşey kum drenleri gibi davranarak, zemin drenajına katkıda bulunur ve sıkışabilirliği azaltır.

2.2.3.Kompaksiyon Kazıkları

Kompaksiyon kazığı, gevşek taneli zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılan bir yöntem olup; ucu kapalı bir kaplama borusunun zemine çakılması, ardından boru içinin dolgu malzemesiyle doldurulması ve son olarak ucun yerinde bırakılarak borunun yukarı doğru çekilmesi prensibine dayanmaktadır (bkz. Şekil 8). Bu yöntemle boru zemine ilerledikçe, yer değiştiren zemin yanlara doğru itilir ve çevre zeminde bir sıkılaşma meydana gelir. Ayrıca, çakma işlemi sırasında oluşan titreşimler, taneli zeminlerin daha yoğun hale gelmesine katkı sağlar.

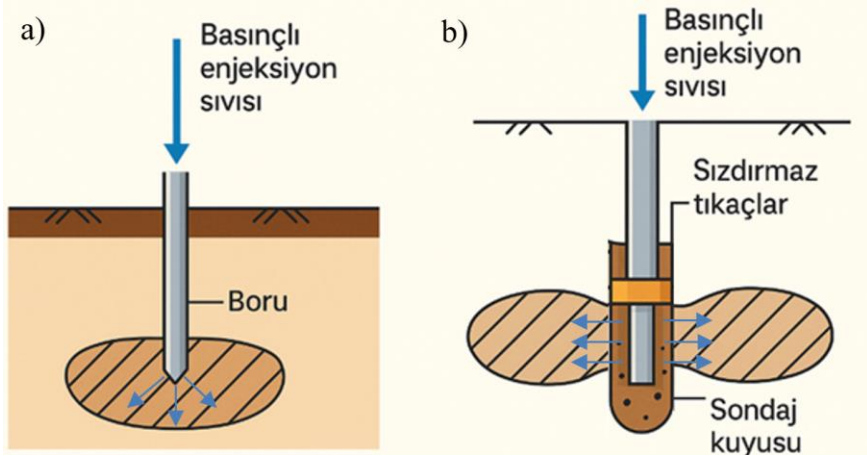
Şekil 8 Kompaksiyon kazığı yöntemiyle zemin iyileştirme sürecinin aşamaları



2.2.4. Enjeksiyon ile Zemin Stabilizasyonu

Enjeksiyon yöntemi, taneli zeminlerin içine belirli bir basınçla özel sıvıların enjekte edilmesi ve bu sıvıların zemin taneleri arasındaki boşluklarda sertleşerek bir kütle oluşturması esasına dayalı bir iyileştirme tekniğidir. Bu yöntem sayesinde zemin daha dayanıklı hale gelir. Genellikle kil ve silt gibi düşük geçirgenliğe sahip zeminler dışında kalan zemin türleri için uygulanabilir. Enjeksiyon işlemi sonucunda, zeminin taşıma kapasitesi artırılır, geçirgenliği azaltılır ve olası oturma problemleri kontrol altına alınabilir. Enjeksiyonun uygulama alanları oldukça geniştir. Örneğin; baraj gövdelerinin altına geçirimsizlik perdesi oluşturulması, mevcut temel sistemlerinin altına rijit bir zemin bloğu kazandırılması, taneli zeminlerdeki tünel kazıları öncesinde kendini taşıyabilen bir zemin kütlesi elde edilmesi ya da zemin ankrajlarının çevresinin desteklenmesi gibi çeşitli mühendislik çözümlerinde kullanılmaktadır. Kullanılan enjeksiyon sıvıları genel olarak iki gruba ayrılır: süspansiyonlar ve kimyasal çözeltiler. Süspansiyonlara örnek olarak çimento şerbeti (çimento + su), çimento + kum + su veya kil + su karışımları verilebilir. Kimyasal enjeksiyon sıvıları ise genellikle silikat bazlı bileşiklerin su ile çözeltileri şeklindedir. Bu sıvılar zemine enjekte edildikten sonra, taneler arası boşluklarda yarı katı kıvamda jel benzeri bir yapı oluşturarak zeminin bütünlüğünü artırır. Enjeksiyon işlemi, karıştırma ve pompalama birimlerinden oluşan bir enjeksiyon santrali ile gerçekleştirilir. Zemine enjeksiyon sıvısı genellikle; enjeksiyon borusu ucundan doğrudan enjekte edilerek ya da sondaj kuyularının yan açıklıklarından sıvı verilerek uygulanır (bkz. Şekil 9). Her iki yöntemde de enjeksiyon işlemi yukarıdan aşağıya ya da aşağıdan yukarıya olacak şekilde, katmanlar halinde ve ardışık biçimde yapılabilir. Planda belirlenen aralıklarla yapılan bu işlemler sayesinde, hedeflenen bölgede sürekli ve dayanıklı bir zemin kütlesi elde edilmiş olur.

Şekil 9 Enjeksiyon yöntemleri a) Bir borunun ucundan b) Sondaj kuyusunun yanlarından



Ayrıca kompaksiyon enjeksiyonu olarak adlandırılan bir özel uygulamada, nispeten kıvamlı ve taze hazırlanmış kumlu harç, belirli bir basınçla temelin altına enjekte edilir. Bu harç, taneler arası boşluklara sızmaz; ancak bulunduğu bölgedeki zemini kendi hacmi oranında yanlara doğru iterek sıkılaştırır. Bu yöntem, özellikle havaalanı pistleri, yol kaplamaları ve basit yapılar altındaki farklı oturumların düzeltilmesinde etkin biçimde kullanılmaktadır. Diğer yandan, jet enjeksiyonu (veya derin karıştırma yöntemi) ise yüksek basınçla çalışan döner enjeksiyon sistemleriyle gerçekleştirilir. Sondaj kuyusu açıldıktan sonra, döner bir başlık vasıtasıyla enjeksiyon sıvısı çok yüksek basınç altında zemine enjekte edilir. Bu sırada çevredeki zemin ile enjeksiyon sıvısı karışır. Sonrasında bu karışım sertleşerek, düşey doğrultuda silindirik bir iyileştirme kolonuna dönüşür.

2.2.5. Elektro-Osmoz Yöntemi

İnce taneli zeminlerde drenaj uygulamaları, yüksek su tutma kapasiteleri ve düşük geçirgenlikleri nedeniyle klasik yöntemlerle oldukça güçlüklerle gerçekleştirilmektedir. Bu tür zeminlerde, taneler arası boşluklardaki suyun serbestçe akıp uzaklaşması sınırlıdır. Bu nedenle, elektro-osmotik yöntemler tercih edilmektedir. Bu yöntemde, zemin içerisine belli aralıklarla yerleştirilen delikli kaplama borulu drenaj kuyuları, negatif kutup (katot) işlevi görürken, karşılıklı olarak yerleştirilen metal çubuklar ise pozitif kutup (anot) görevini üstlenmektedir. Bu iki elektrot sistemi arasına bir doğru akım kaynağı (örneğin batarya) bağlanarak, zemin içerisinde bir elektriksel potansiyel farkı oluşturulur. Oluşan elektrik alan sayesinde, zemindeki su, anot yönünden katoda doğru hareket ettirilir ve bu sayede zemin içerisindeki suyun etkin bir şekilde uzaklaştırılması sağlanır.

2.2.6. Isı ile Stabilizasyon

Isıl zemin iyileştirme yöntemi, zemine açılan kuyular içerisinde akaryakıt-hava karışımı, doğalgaz veya benzeri yanıcı maddelerin yakılmasıyla yüksek sıcaklıklar

(yaklaşık 500–1000 °C) elde edilmesi esasına dayanır. Bu işlem sonucunda, özellikle kil içeriği yüksek zeminlerde, kuyu çevresinde yaklaşık 2–3 metre çapında silindirik alanlarda belirgin bir sertleşme meydana gelir. Uygulama sahasında hedeflenen bölgeyi kapsayacak şekilde bu işlem belirli aralıklarla tekrarlanır. Elde edilen yüksek sıcaklık, kil mineralleri üzerinde yapısal dönüşümlere neden olmakta ve bu sayede zemin, adeta fırınlanmış bir seramik malzeme gibi davranarak geri dönüşsüz bir dayanım artışı göstermektedir. Bu tür ısıtma işlemi, zeminlerin uzun vadeli rijitlik ve stabilite gereksinimlerini karşılamak amacıyla tercih edilmektedir.

Kaynakça

- Al-Rawas, A. A., Hago, A.W., Al Sarmi, H. (2005). Effect of lime, cement and saroj (artificial pozzolan) on the swelling potential of an expansive soil from Oman. Building and Environment. 40, 5, 681-687. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.08.028>
- Aytekin, M. (2004). Deneysel Zemin Mekaniği, Teknik Yayınevi, Ankara, 206-207.
- Baradan, B. (2000). Yapı Malzemesi II, Mühendislik Fakültesi Yayınları No. 207, Dokuz Eylül Üniversitesi Matbaası, İzmir, 1-7.
- Çalık, Ü. (2012). Perlitin Puzolanik Katkı Olarak Kireç ile Birlikte Zemin Stabilizasyonunda Kullanımı. Doktora tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Edil, T. B., Benson, C. H., Bin-Shafique, M. S., Kim, W., Tanyu, B. F. & Senol, A. (2002). Field Evaluation of Construction Alternatives for Roadway over Soft Subgrade, Record No. 1786, Transportation Research Board, Washington, 36-48.
- Hunt, R., E. (1986). Geotechnical Engineering Techniques and Practices, McGraw Hill, USA.
- Hunt, R., E. (1994). Geotechnical Engineering Investigation Manual, McGraw Hill, USA.
- Ingles, O. G. & Metcalf, J. B. (1973). Soil Stabilization, John Wiley & Sons, New York.
- Jewell, R. J. (1968). An Evaluation of Criteria for Selection of Pavement Base Course Materials in Western Australia, Master Thesis, University of Western Australia, Australia.
- Mitchell, J. K. (1976). Stabilization of Soils for Foundations of Structures, University of California-Department of Civil Engineering Press, Berkeley.
- Mitchell, J., K. & Gallagher, P., M. (1998). Guidelines for Ground Improvement of Civil Works and Military Structures and Facilities, Publication No. ETL 1110-1- 185, U.S. Army of Corps. of Engineers, Washington, 109 p.
- Önalp, A. & Sert, S. (2006). Geoteknik Bilgisi III - Bina Temelleri, Birsen Yayınevi, İstanbul, 206-243.
- Tunç, A. (2002). Yol Mühendisliğinde Geoteknik ve Uygulamaları, Atlas Yayın Dağıtım, Ankara, 490-493.
- Uzuner, B. A. (2011). Temel Mühendisliğine Giriş, Derya Kitabevi, Trabzon, 330-347.
- Van Impe, W. F. (1989). Soil Improvement Techniques and Their Evolution, A.A. Balkema, Rotterdam, 125 s.

- Winterkorn, H. F. & Fang, H. Y. (1975). Foundation Engineering Handbook, Van Nostrand Reinhold Publication, London, 176 s.
- Yıldırım, S. (2002). Zeminlerin İncelenmesi ve Temel Tasarımı, Birsen Yayınevi, İstanbul, 466 s.

